

DUCTILIDAD DE UNA CONEXIÓN A MOMENTO EMPLEANDO  
VIGAS DE ALMA EXPANDIDA

*EFREN ALBERTO RAMÍREZ MONTOYA*

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
SANTIAGO DE CALI

2011

DUCTILIDAD DE UNA CONEXIÓN A MOMENTO EMPLEANDO  
VIGAS DE ALMA EXPANDIDA

EFRÉN ALBERTO RAMÍREZ MONTOYA

Trabajo de grado para optar al título de  
Magister en Ingeniería Civil

Director

Gilberto Areiza Palma M.Sc

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
SANTIAGO DE CALI

2011

Nota de aceptación:

---

---

---

---

Director

---

Jurado

---

Jurado

Santiago de Cali, Septiembre 14 de 2011



*A mis hijas y esposa por su dulce compañía y  
a mis incondicionales padres.*



## ***AGRADECIMIENTOS***

Las contribuciones, el incentivo y el respaldo de muchas personas hicieron que esta investigación fuera posible, por lo tanto el autor expresa su agradecimiento a:

**Gilberto Areiza Palma**, Director de la Investigación, por su sugerencia para el desarrollo de la investigación y por sus valiosas orientaciones.

**Metal Oriente Ltda.**, representada por el Ingeniero Carlos Alberto Aristizabal por su apoyo y patrocinio en la fabricación y montaje de la estructura metálica.

**Esteban Vanegas y William Viveros**, Laboratoristas de Estructuras de la Universidad del Valle, por su ayuda en la instrumentación.

**Sandra Milena Pulido**. Ingeniería Sanitaria, por su compañía, sus ideas para explicar los resultados y su asistencia para la presentación de algunos capítulos.



## CONTENIDO

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN..... 1

### 1 PROBLEMA..... 3

#### **1.1 DIAGNÓSTICO..... 3**

##### *1.1.1 ¿QUÉ SON LAS VIGAS DE ALMA EXPANDIDA? ..... 3*

##### *1.1.2 ASPECTO HISTÓRICOS VIGAS DE ALMA EXPANDIDA. .... 5*

##### *1.1.3 DESARROLLO ALCANZADO EN CONEXIONES A MOMENTO ..... 8*

#### **1.2 PRONÓSTICO ..... 13**

#### **1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 13**

#### **1.4 OBJETIVOS..... 13**

##### *1.4.1 GENERAL..... 13*

##### *1.4.2 ESPECÍFICOS..... 14*

#### **1.5 JUSTIFICACIÓN..... 14**

#### **1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES ..... 16**

##### *1.6.1 LIMITACIONES..... 16*

##### *1.6.2 ALCANCES..... 16*

### 2 MARCO DE REFERENCIA..... 17

#### **2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 17**

##### *2.1.1 ELEMENTOS DE ALMA EXPANDIDA..... 17*

##### *2.1.2 CONEXIONES A MOMENTO VIGA-COLUMNA..... 20*

#### **2.2 MARCO CONCEPTUAL ..... 22**

#### **2.3 MARCO TEÓRICO ..... 23**

##### *2.3.1 PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO..... 23*

##### *2.3.2 VIGAS DE ALMA EXPANDIDA..... 30*

#### **2.4 MARCO JURÍDICO ..... 38**



<b>3</b>	<b><u>DISEÑO DE LA CONEXIÓN.....</u></b>	<b><u>40</u></b>
<b>3.1</b>	<b>SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS.....</b>	<b>40</b>
3.1.1	VIGA DE ALMA EXPANDIDA .....	40
3.1.2	COLUMNA.....	43
3.1.3	LAMINA HR.....	44
<b>3.2</b>	<b>SELECCIÓN DE LA CONEXIÓN .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3</b>	<b>METODOLOGÍA DE DISEÑO EMPLEADA.....</b>	<b>45</b>
3.3.1	RELACIONES ANCHO ESPESOR.....	45
3.3.2	CÁLCULO DE LOS MOMENTOS $M_p$ Y $M_{pr}$ .....	48
3.3.3	MOMENTO DE FLUENCIA $M_{yf}$ DE LA VIGA EN LA CARA DE LA COLUMNA .....	49
3.3.4	CALCULO DE LAS CUBREPLACAS.....	50
3.3.5	VERIFICACIÓN COLUMNA FUERTE VIGA DÉBIL.....	55
3.3.6	CHEQUEO DE LA ZONA DEL PANEL.....	58
3.3.7	CHEQUEO PLATINAS DE CONTINUIDAD.....	60
3.3.8	ARRIOSTRAMIENTO PARA ESTABILIDAD DE LA VIGA.....	62
3.3.9	MECANISMO DE FLUENCIA ESPERADO .....	63
3.3.10	RECIBIDOR A CORTANTE DEL ALMA.....	64
3.3.11	SOLDADURA DE PLACA CONTINUIDAD – ALMA COLUMNA.....	71
3.3.12	DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO.....	75
3.3.13	RESUMEN DEL DISEÑO .....	76
<b>4</b>	<b><u>FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO .....</u></b>	<b><u>80</u></b>
<b>4.1</b>	<b>FABRICACIÓN DE LA VIGA DE ALMA EXPANDIDA .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2</b>	<b>FABRICACIÓN DE LA CONEXIÓN .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3</b>	<b>COSTOS .....</b>	<b>83</b>
<b>5</b>	<b><u>ENSAYO EN EL MARCO DE PRUEBAS.....</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b>5.1</b>	<b>MONTAJE E INSTRUMENTACIÓN .....</b>	<b>88</b>
5.1.1	INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA.....	89

---



5.1.2	<i>HISTORIA DE CARGA.....</i>	95
<b>5.2</b>	<b>RESULTADOS DEL ENSAYO.....</b>	<b>96</b>
5.2.1	<i>RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN.....</i>	99
<b>5.3</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>103</b>
5.3.1	<i>CLASIFICACIÓN POR RESISTENCIA .....</i>	104
5.3.2	<i>CLASIFICACIÓN POR RIGIDEZ.....</i>	105
5.3.3	<i>CLASIFICACIÓN POR DUCTILIDAD .....</i>	108
5.3.4	<i>PANDEO DEL ALMA ENTRE PERFORACIONES .....</i>	110
<b>6</b>	<b><u>CONCLUSIONES .....</u></b>	<b>113</b>
<b>7</b>	<b><u>RECOMENDACIONES.....</u></b>	<b>115</b>
	<b><u>BIBLIOGRAFÍA .....</u></b>	<b>116</b>
	<b><u>ANEXOS .....</u></b>	<b>120</b>

---





## ***LISTA DE FIGURAS***

<i>Figura 1. Construcción perfiles de alma expandida</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2. Parámetros viga celular</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Viga Angelina</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4. Proceso automatizado de corte</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5. Aplicaciones vigas de alma expandida</i>	<i>7</i>
<i>Figura 6. Conexión tipo RBS</i>	<i>9</i>
<i>Figura 7. Conexiones de placa extrema</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8. Conexión con cubreplaca pernada</i>	<i>11</i>
<i>Figura 9. Conexión soldada WUF-W</i>	<i>12</i>
<i>Figura 10. Conexión tipo Kaiser</i>	<i>12</i>
<i>Figura 11. Detalles viga en celosía de elementos angulares</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12. Analogía con viga Vierendeel</i>	<i>17</i>
<i>Figura 13. Esquema de Conexión propuesta Universidad de Villanova</i>	<i>22</i>
<i>Figura 14. Comportamiento Inelástico de un pórtico con articulaciones plásticas</i>	<i>24</i>
<i>Figura 15. Esfuerzos en las secciones críticas de la conexión</i>	<i>25</i>
<i>Figura 16. Cálculo de la cortante de plastificación</i>	<i>26</i>
<i>Figura 17. Cortante horizontal en el alma entre perforaciones</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18. Sección crítica de Olander</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19. Viga celular luz=20m</i>	<i>40</i>
<i>Figura 20. Parámetros viga celular empleada</i>	<i>41</i>
<i>Figura 21. Geometría de la columna</i>	<i>43</i>
<i>Figura 22. Conexión empleada</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Diagrama de cuerpo libre para <math>L_p</math></i>	<i>51</i>
<i>Figura 24. Cubreplacas de la conexión</i>	<i>54</i>
<i>Figura 25. Localización estimada de <math>V_{pr}</math></i>	<i>56</i>
<i>Figura 26. Placas de enchape y continuidad</i>	<i>62</i>



<i>Figura 27. Recibidor a cortante del alma</i>	<i>64</i>
<i>Figura 28. Bloque de cortante</i>	<i>69</i>
<i>Figura 29. Tamaño mínimo de soldaduras de filete</i>	<i>71</i>
<i>Figura 30. Soldadura placa de continuidad</i>	<i>71</i>
<i>Figura 31. Determinación de zona K</i>	<i>72</i>
<i>Figura 32. Diseño de la conexión</i>	<i>73</i>
<i>Figura 33. Comparativo costo de fabricación</i>	<i>86</i>
<i>Figura 34. Metodología del ensayo</i>	<i>87</i>
<i>Figura 35. Actuador marco de prueba</i>	<i>88</i>
<i>Figura 36. Montaje en el marco de pruebas</i>	<i>89</i>
<i>Figura 37. Instrumentación realizada</i>	<i>90</i>
<i>Figura 38. Identificación LVDT</i>	<i>91</i>
<i>Figura 39. Localización strain gauge</i>	<i>92</i>
<i>Figura 40. Factor de los instrumentos</i>	<i>94</i>
<i>Figura 41. Historia de carga</i>	<i>96</i>
<i>Figura 42. Fotos 1 y 2 ensayo</i>	<i>97</i>
<i>Figura 43. Foto 3 cubreplaca superior</i>	<i>97</i>
<i>Figura 44. Foto 4 Pandeo y restricción lateral</i>	<i>98</i>
<i>Figura 45. Foto 5 vista superior</i>	<i>98</i>
<i>Figura 46. Desplazamientos en el Actuador</i>	<i>99</i>
<i>Figura 47. Carga en el actuador</i>	<i>100</i>
<i>Figura 48. Desplazamiento Cubreplaca Superior</i>	<i>100</i>
<i>Figura 49. Esfuerzos en las galgas</i>	<i>101</i>
<i>Figura 50. Envolvente de Cargas</i>	<i>102</i>
<i>Figura 51. Carga vs Rotación</i>	<i>102</i>
<i>Figura 52. Momento en la cara de la columna</i>	<i>103</i>
<i>Figura 53. Clasificación por resistencia</i>	<i>104</i>
<i>Figura 54. Clasificación por Rigidez</i>	<i>105</i>

---



<i>Figura 55. Rigidez de la conexión</i>	<i>107</i>
<i>Figura 56. Rigidez de la zona del panel</i>	<i>108</i>
<i>Figura 57. Clasificación por ductilidad</i>	<i>109</i>
<i>Figura 58. Desplazamiento fuera del plano de alma entre perforaciones</i>	<i>111</i>
<i>Figura 59. Desplazamiento fuera del plano zona Tee</i>	<i>112</i>



## ***LISTA DE TABLAS***

<i>Tabla 1. Resumen del Diseño</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 2. Análisis de precios unitarios</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 3. Costos mano de obra</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 4. Insumos de fabricación</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5. Características de la conexión</i>	<i>89</i>



## ***RESUMEN***

Las vigas de alma expandida son perfiles metálicos I de alma llena o vigas armadas que al realizarles un corte en el alma, zigzagueante o circular, desplazarlos y soldarlos en el alma dan como resultado perfiles de mayor altura y rigidez. Su principal beneficio radica en que al ser utilizadas en grandes luces se pueden obtener reducciones en el costo total del proyecto hasta del 40% en comparación a vigas de alma llena. En la actualidad se conoce información acerca del comportamiento a flexión, cortante y fuerza axial de los perfiles de alma expandida, sin embargo, no se tiene un conocimiento detallado del comportamiento de las conexiones a momento viga-columna. Por consiguiente, la pregunta que se planteó es ¿Cuál es el comportamiento de una conexión a momento viga-columna con elementos de alma expandida?. Para resolver este problema se construyó una conexión a momento a escala real con una viga celular encontrando una capacidad de rotación máxima de 0.03 radianes y una capacidad de rotación suficiente que permite su utilización en pórticos resistentes a momento con capacidad moderada de disipación de energía PRM-DMO.

**Palabras Clave:** cellular beam, castellated beam, conexión a momento, calificación de conexión.



## ***INTRODUCCIÓN***

En Colombia donde la construcción de estructuras metálicas es reciente y está en crecimiento, no se pueden hacer a un lado sistemas constructivos que están a la vanguardia en el mundo de la ingeniería estructural. Este es el caso de la utilización de vigas de alma expandida. Con el fin de utilizar estos elementos no sólo como viguetas, sino también como vigas dentro del sistema de resistencia sísmica de las estructuras, se debe conocer la capacidad de rotación de la conexión a momento con vigas de alma expandida.

De los perfiles conocidos de alma expandida se empleó el celular debido a sus fortalezas en cuanto a resistencia y versatilidad en el diseño con respecto a su antecesora, la viga *castelada*. Uno de los motores que impulsó su desarrollo en Estados Unidos y Europa fue la implementación de sistemas automatizados de corte. Dadas nuestras condiciones locales, la fabricación del espécimen de viga celular fue hecho de forma manual realizando los cortes con equipo de plasma. Por esta razón el costo de fabricación incrementa un 30% con respecto al de las vigas en celosía.

La conexión diseñada fue una conexión con cubreplaca soldada a la columna, con el objetivo de que tenga aplicación inmediata, al ser de fácil construcción, económica y conocida por los fabricantes de estructuras de la región.

El protocolo de ensayo cumplió con todas las exigencias al respecto del NSR-10 y del Apéndice S del ANSI/AISC 341-05. La falla estuvo controlada por el pandeo del alma entre las perforaciones. Clasificando la conexión como totalmente restringida, parcialmente dúctil y con capacidad de rotación suficiente para ser empleada en



pórticos resistentes a momento con capacidad moderada de disipación de energía  
PRM-DMO.



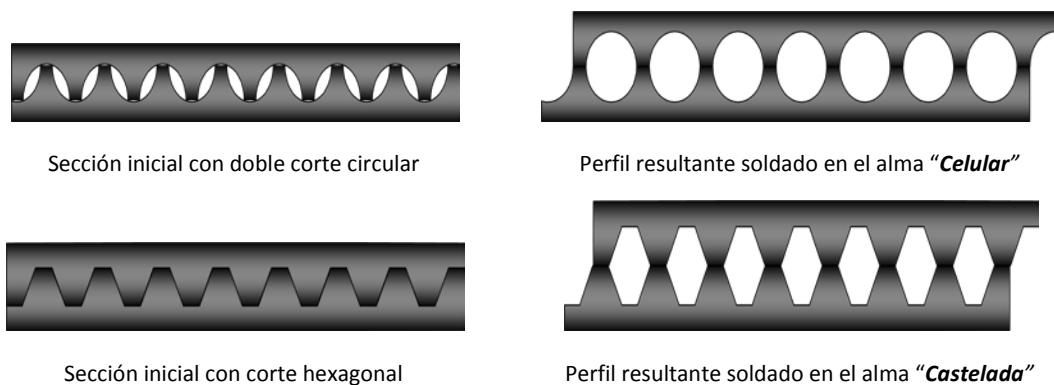
## 1 PROBLEMA

### 1.1 DIAGNÓSTICO

#### 1.1.1 ¿Qué son las vigas de alma expandida?

Estos elementos son perfiles metálicos I de alma llena o vigas armadas que al realizarles un corte en el alma, zigzagante o circular, desplazarlos y soldarlos en el alma dan como resultado perfiles de mayor altura y rigidez, ver Figura 1. Dependiendo de la forma como se realice el corte se conocen como *castelada*, si el corte es hexagonal con inclinaciones de  $45^\circ$  a  $60^\circ$ , y *Celular* si se realiza doble corte circular.

Figura 1. Construcción perfiles de alma expandida



Dentro de las principales ventajas obtenidas al emplear vigas de alma expandida en la fabricación de estructuras metálicas se encuentran:

1. Se obtiene mayor resistencia y rigidez con el mismo peso.
2. Se reduce entre el 20% y el 50% del peso de la estructura.

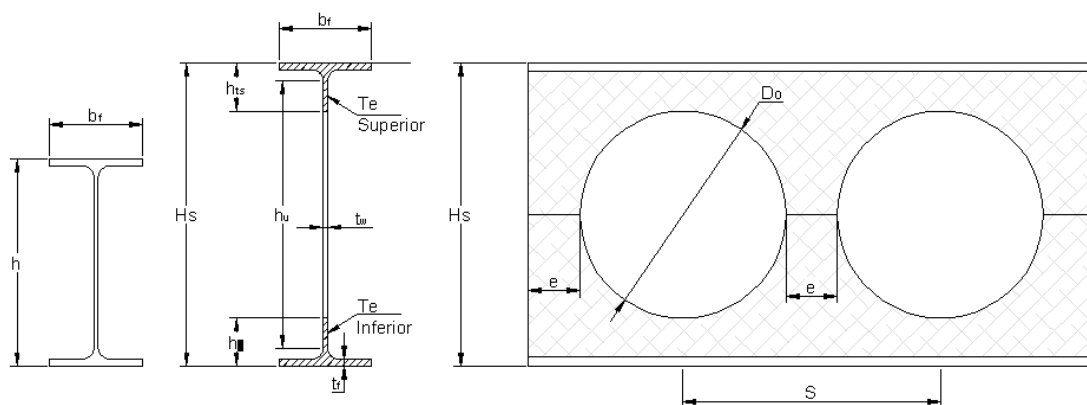




3. Se obtienen menores costos de transporte.
4. La cimentación resultante es más pequeña.
5. Los orificios internos de las vigas sirven para atravesar ductos reduciendo el espesor del entrepiso.
6. Se reduce la altura total del edificio.
7. Menor área de fachadas.
8. Mayor iluminación y ventilación natural de los espacios
9. Se pueden obtener reducciones en el costo total del proyecto hasta del 40%.

Actualmente son más empleadas las vigas tipo *Celular* debido a que presentan mayor flexibilidad en el diseño al permitir diferentes configuraciones de Altura ( $H_s$ ), separación entre perforaciones ( $S$ ) y diámetro de la perforación ( $D_o$ ), ver Figura 2.

**Figura 2. Parámetros viga celular**



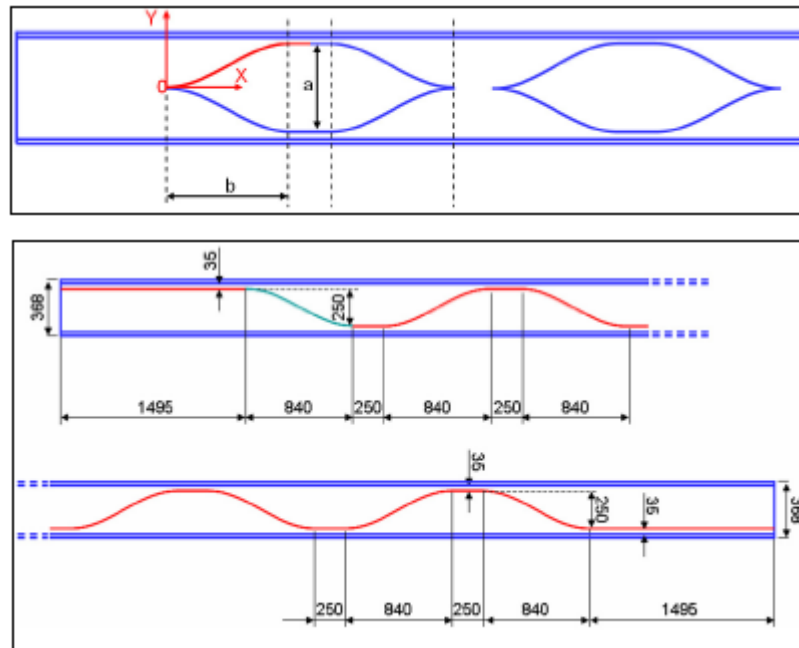
Dentro de los últimos avances en la fabricación de vigas de alma expandida se encuentra la *Angelina*, ver Figura 3. Esta viga ha sido desarrollada a partir de una idea del arquitecto Francés *Claude Vasconi* cuyo objetivo era agregar un aspecto ‘sensual’ de ojo rasgado a las ya existentes vigas celulares. Algunas ventajas de esta



nueva geometría es que se requiere un sólo corte en el alma y se reduce la longitud de soldadura. Esta investigación fue desarrollada en la universidad de Liège, Bélgica con la colaboración del grupo de investigación de la siderúrgica ArcelorMittal (1). La ecuación para línea de corte recomendada es:

$$y = \frac{a}{4} \left\{ \sin \left[ \pi \left( \frac{x}{b} + 1.5 \right) \right] + 1 \right\} \quad [1-1]$$

Figura 3. Viga Angelina



### 1.1.2 Aspecto históricos vigas de alma expandida.

Dado que las vigas de alma expandida son fabricadas mediante un proceso de corte y soldadura en el alma, la aparición de éstas estuvo estrechamente relacionada con



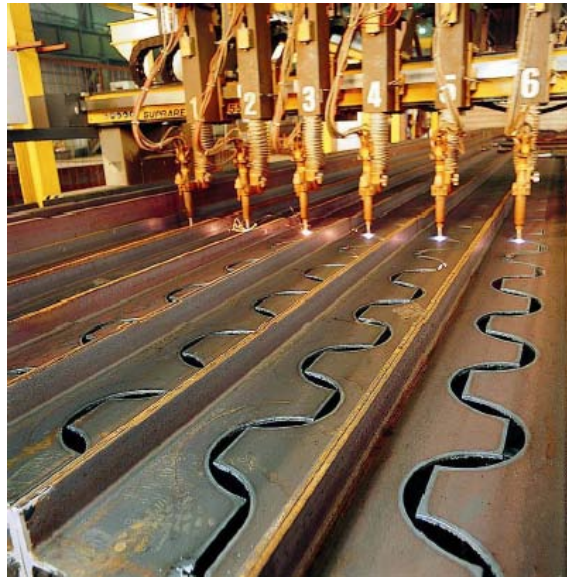
el desarrollo de la tecnología de soldadura eléctrica en la construcción metálica a finales de la década de 1920. Inicialmente fueron llamadas vigas Boyd como reconocimiento al Ingles Geoffrey Murray Boyd quien las inventó realizando trabajos de construcción de puentes férreos en Argentina. La primera aplicación para patente de vigas de alma expandida tipo *Castelada* data de 1937 y sólo hasta 1939 la oficina de patentes Británica la adjudicó al aplicante G.M. Boyd (1).

Según **Grünbauer** (1) las primeras vigas *Castellated* fueron fabricadas manualmente a principios de la década de 1930 por la empresa Skoda en Pilsner, estas fueron vigas de entrepiso con una luz libre de 12m para una fábrica en Doudlevec, República Checa.

Un factor importante que impulsó el empleo de las vigas *Casteladas* fue el desarrollo de tecnologías para su producción. Inicialmente, las vigas eran cortadas a mano empleando plantillas metálicas, sólo después de la segunda guerra mundial los altos costos de mano de obra obligaron a implementar sistemas de corte automatizados, siendo Hubert Litzka durante la década de 1950 quien desarrollo la primera línea de fabricación automática para las vigas que también fueron llamadas *Vigas Litzca*.

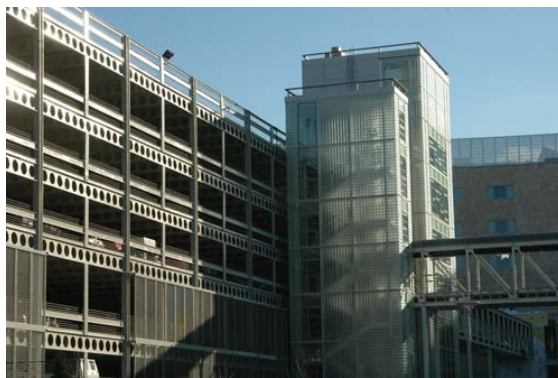
En la década de 1970 se introdujeron brazos mecánicos para operar las boquillas de corte y posteriormente fueron reemplazados por sistemas de corte con lectura óptica, los cuales son actualmente empleados ya que son fáciles de programar y pueden cortar en diversos trazos con una gran precisión, ver Figura 4.

**Figura 4. Proceso automatizado de corte**



Actualmente, en Estados Unidos, Europa y Asia las vigas de alma expandida tienen gran aplicación en entrepisos de edificios de parqueaderos y en cubiertas con luces mayores a 20m de bodegas, Centro Comerciales, edificios residenciales, etc. La Figura 5 muestra algunos ejemplos de su aplicación.

**Figura 5. Aplicaciones vigas de alma expandida**





### **1.1.3 Desarrollo alcanzado en Conexiones a Momento**

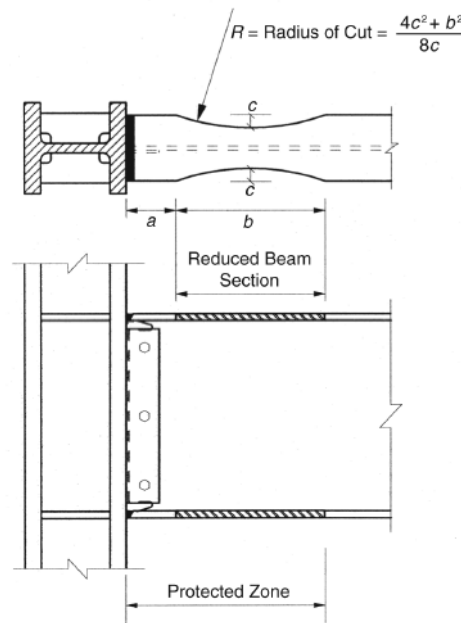
El actual Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10 establece que las conexiones que hagan parte del sistema de resistencia sísmica en pórticos resistentes a momento en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia deberán ser calificadas conforme el título F.3.11.1 o de lo contrario emplear las conexiones precalificadas del ANSI/AISC 358. A continuación se hace un resumen de las conexiones a momento precalificadas para sistemas DES Y DMO, siendo evidente la carencia de conexiones a momento con vigas de alma expandida (3), (4).

#### *1.1.3.1 Conexión con Viga de sección reducida o Hueso de perro (RBS).*

En una viga de sección reducida los patines de las vigas son especialmente cortados en una zona adyacente a la conexión viga-columna ver Figura 6, en la cual la localización de la rotula plástica se debe producir entre la sección reducida. Esta conexión está calificada para sistemas DES Y DMO siguiendo las recomendaciones realizadas en el capítulo 5 ANSI/AISC 358-05. También está calificada para usar en sección compuesta con el concreto.



**Figura 6. Conexión tipo RBS**



*Fig. 5.1. Reduced beam section connection.*

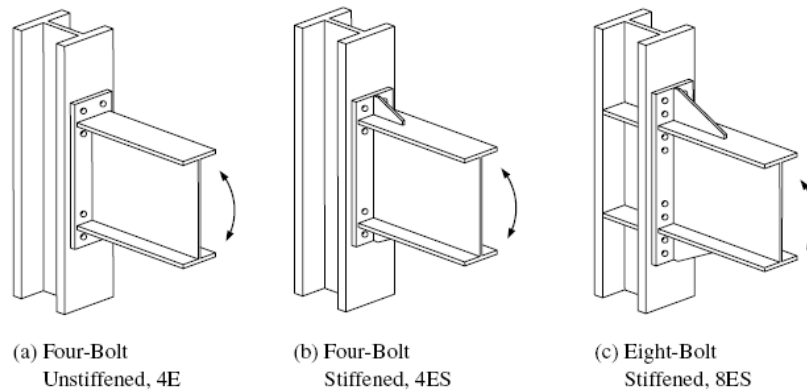
#### 1.1.3.2 Conexión pernada de placa extrema atiesada y sin atiesar.

Estas conexiones son fabricadas soldando la viga a la placa extrema y pernando la placa al patín de la columna. Las tres configuraciones mostradas en la Figura 7 están calificadas para sistemas DES Y DMO siguiendo las recomendaciones realizadas en el capítulo 6 ANSI/AISC 358-05. En ANSI/AISC 358-05s1-09 (4) se amplía la cobertura de la calificación para usar en sección compuesta con el concreto en sistemas DES, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- La altura de la viga debe ser superior a 610mm
- No deben instalarse conectores de cortante dentro de una distancia igual a 1.5 veces la altura de la viga medida desde el patín de la columna conectada.
- La losa de concreto debe estar separada al menos 25mm de ambos patines de la columna. Se permite rellenar este espacio con sellos flexibles.



**Figura 7. Conexiones de placa extrema**

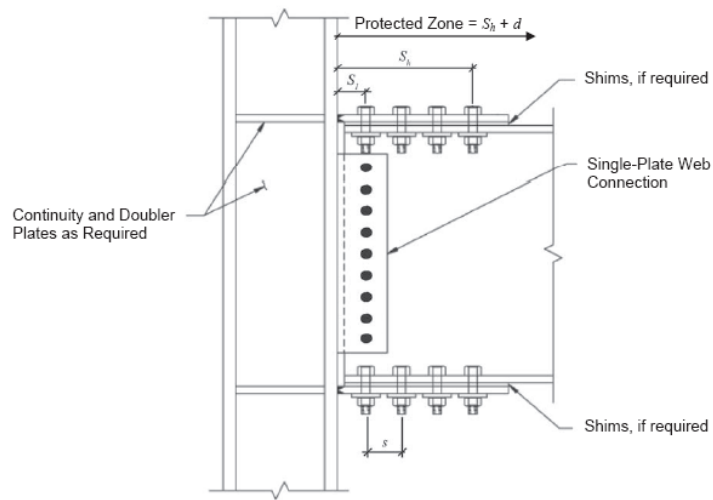


#### *1.1.3.3 Conexión con cubreplaca pernada*

Esta conexión emplea placas soldadas al patín de la columna y pernadas a los patines de las vigas. Las placas deben ser iguales, con soldadura de penetración total (CJP) a la columna y pernos de alta resistencia en los patines de la viga. El alma de la viga es pernada a una placa de cortante que está soldada a la columna. Las perforaciones son estándar en las cubreplacas y de ranura corta en la placa de cortante, ver Figura 8. El inicio de la fluencia y la formación de la rótula plástica se espera que ocurran en la viga en la región cercana al final de las cubreplacas (4). También está calificada para usar en sección compuesta con el concreto siempre y cuando la losa de concreto esté separada al menos 25mm de ambos patines de la columna, se permite rellenar este espacio con sellos flexibles.



**Figura 8. Conexión con cubreplaca pernada**



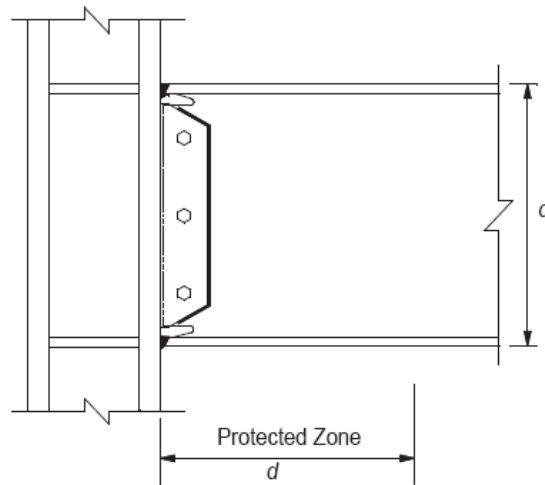
#### *1.1.3.4 Conexión soldada WUF-W*

Esta conexión es similar a la empleada en las estructuras de Estados Unidos antes del sismo de Northridge en 1994, en la cual la plastificación se produce en la viga en la cara de la columna, no obstante algunas mejoras introducidas como el detallado de los agujeros de acceso para la soldadura y la resistencia al impacto Prueba V-Charpy de la soldadura garantizan un nivel de rotación adecuado para las zonas DES Y DMO ver Figura 9. También está calificada para usar en sección compuesta con el concreto.





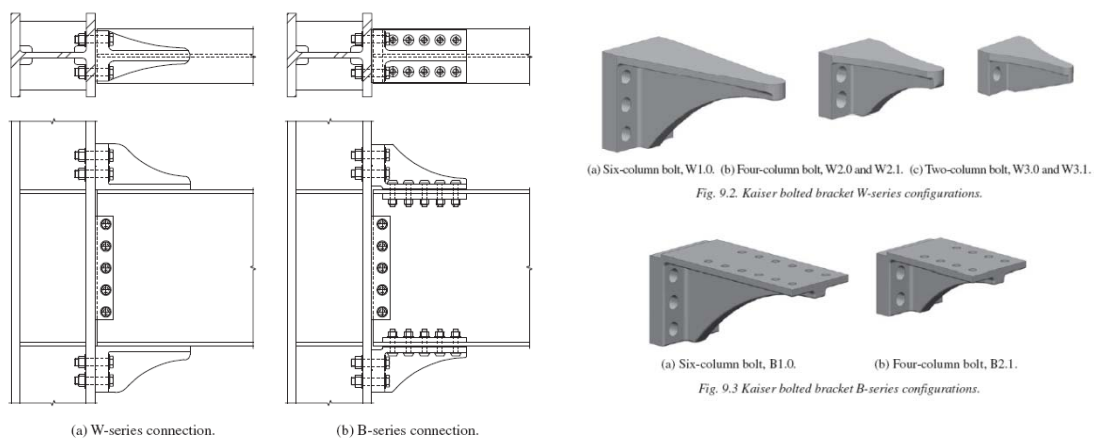
**Figura 9. Conexión soldada WUF-W**



#### 1.1.3.5 Conexión tipo Kaiser (KBB)

Esta conexión está reportada en el capítulo 9 de ANSI/AISC 358-05s1-09, ver Figura 10. Se encuentra protegida por patente US 6.073.405 otorgada a Steel Cast Connections LLC, por lo tanto su utilización debe ser con licencia del autor <sup>1</sup>.

**Figura 10. Conexión tipo Kaiser**



<sup>1</sup> <http://www.steelcastconnections.com>



## **1.2 PRONÓSTICO**

Un país como el nuestro en el cual la construcción de estructuras metálicas es reciente y en crecimiento, no puede hacer a un lado sistemas constructivos que están a la vanguardia en el mundo de la ingeniería estructural. Por lo tanto, empleando la teoría desarrollada para el diseño de los elementos de alma expandida, se diseñará y conocerá el comportamiento en el rango elástico e inelástico de una conexión a momento viga-columna y se iniciará el proceso de calificación de la conexión de acuerdo con Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

## **1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En la actualidad se conoce información acerca del comportamiento a flexión, cortante y fuerza axial de los perfiles de alma expandida, sin embargo, no se tiene un conocimiento detallado del comportamiento de las conexiones a momento viga-columna.

Por consiguiente, la pregunta que se plantea es ¿Cuál es el comportamiento de una conexión a momento viga-columna con elementos de alma expandida?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

Describir el comportamiento de una conexión a momento viga-columna en el rango elástico e inelástico empleando elementos de alma expandida.



### **1.4.2 Específicos**

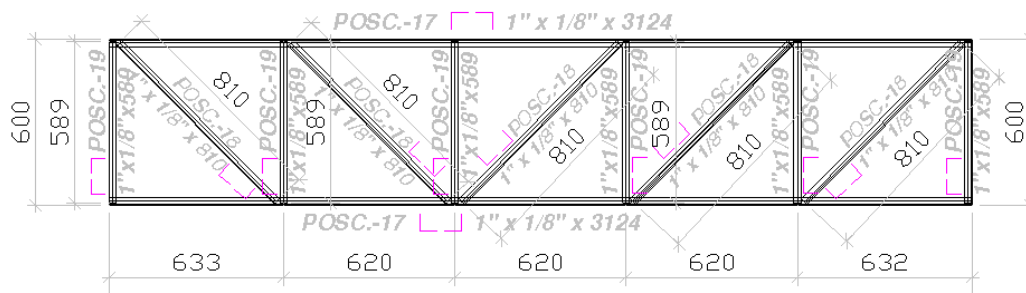
- Revisión del estado del arte de perfiles de alma expandida.
- Construir un prototipo y ensayarlo experimentalmente.
- Conocer la capacidad de disipación de energía de la conexión.
- Recomendar una metodología de diseño de la conexión.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN**

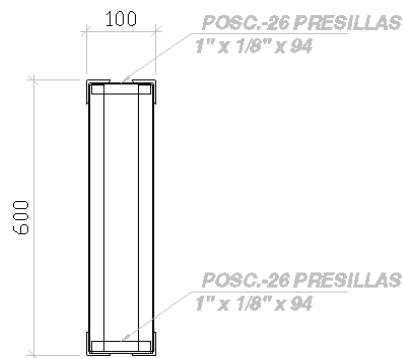
Actualmente en Colombia se emplean elementos tipo celosía o vigas de alma abierta en el sistema de resistencia a cargas verticales y sísmicas, como solución estructural, en edificaciones metálicas de grandes luces ( $L > 12\text{m}$ ). La fabricación de los elementos tipo celosía, con perfiles angulares o tubulares, es realizada artesanalmente cortando elemento por elemento y ubicándolos manualmente según una plantilla elaborada previamente, las cuales se trazan en piso. Una vez construida la plantilla se deben unir las dos caras de la viga por medio de presillas, para posteriormente soldar todas las uniones de los elementos, algunas veces adicionando cartelas para aumentar la longitud de soldadura, ver Figura 11. El proceso anteriormente descrito implica altos tiempos de producción y elevados costos de fabricación y transporte.



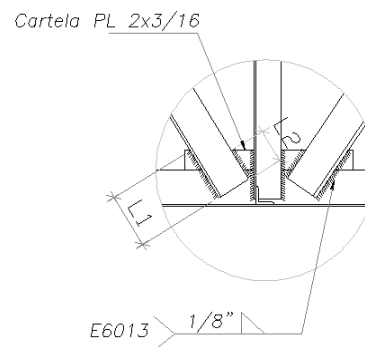
**Figura 11. Detalles viga en celosía de elementos angulares**



**(a) Configuración típica viga en celosía**



**(b) Sección transversal**



**(c) Detalle de conexión**

En países industrializados se emplean cada vez más, perfiles de alma expandida como una solución eficiente y económica para diversos proyectos de estructuras metálicas dado sus múltiples ventajas con respecto a los perfiles de alma llena y celosía, sin embargo su aplicación se realiza mediante conexiones simples a cortante en la mayoría de los casos.

Por lo tanto, al conocer el comportamiento de la conexión a momento, se podrá difundir el uso de los sistemas constructivos de perfiles de alma expandida en la industria Colombiana, no sólo en viguetas sino también en elementos que hagan parte del sistema de resistencia sísmica de las estructuras.



## **1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES**

### **1.6.1 Limitaciones**

- Las cargas y desplazamientos máximos en los ensayos del prototipo dependerán de la capacidad del marco de pruebas.
- Sólo se construirá un prototipo.
- El prototipo será construido empleando perfiles de alma llena comerciales en Colombia.
- Los perfiles de alma expandida se construirán manualmente, sin emplear sistemas automatizados.

### **1.6.2 Alcances**

- Construir un prototipo a escala real y ensayarlo experimentalmente en el marco de pruebas de la Universidad del Valle.
- Servir como punto de partida para la calificación de la conexión de acuerdo con el reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.
- Promover el uso de los sistemas constructivos de perfiles de alma expandida en la industria Colombiana.
- Impulsar el empleo de las estructuras metálicas en la región.



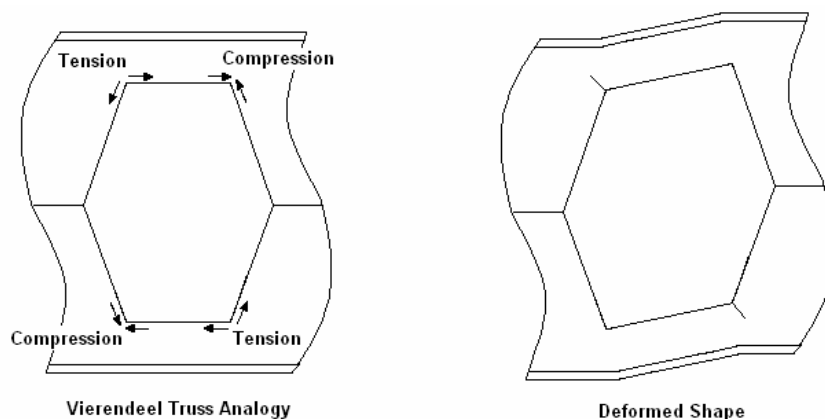
## **2 MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1.1 Elementos de Alma Expandida.**

Siendo su invento a mediados de la década de 1930, sólo vino a tener impacto alrededor de 1950 con el desarrollo de los sistemas industrializados de soldadura y corte, a partir de ésta década se han realizado numerosas investigaciones con el fin de optimizar su diseño y modelar con mayor certeza el comportamiento a flexión, cortante y fuerza axial. En 1957, Toprac, Altfillisch, y Cooke encontraron que expandiendo el alma de los elementos, las vigas podían soportar momentos mayores hasta un 35%. En 1964, Boyer realizó las primeras comparaciones con las vigas de alma llena y encontró una reducción de costos hasta del 22%. Por otra parte, realizó la analogía con el comportamiento de una viga vierendeel en la cual algunos elementos dentro del alma estaban a compresión y otros a tracción, como se muestra en la Figura 12. De esta manera desarrolló tablas de diseño para los elementos de alma expandida.

**Figura 12. Analogía con viga Vierendeel**





En 1984, Kerdal y Nethercot (5) determinaron que existen seis modos de falla en los elementos de alma expandida. Además, realizaron una serie de ensayos a esfuerzos últimos y encontraron que siempre ocurría pandeo lateral y que la falla característica de los prototipos generalmente era una combinación de cualquiera de los seis modos de falla:

1. Formación del mecanismo tipo *Vierendeel*.
2. Pandeo lateral-torsional del alma entre perforaciones.
3. Fractura de la unión soldada.
4. Pandeo lateral-torsional del elemento en toda la luz.
5. Pandeo del alma entre perforaciones.
6. Formación de un mecanismo a flexión.

La única forma de evaluar modos de falla diferentes al pandeo era proporcionar adecuado soporte lateral. Por consiguiente afirmaron que el soporte lateral era requerido para que las vigas alcanzaran el esfuerzo flector máximo.

En 2001, Chung, Liu y Ko (6) aplicaron la analogía de la viga *vierendeel* en vigas de alma expandida con perforaciones circulares y emplearon una fórmula de interacción lineal para calcular la capacidad a momento en la sección T arriba y abajo de la perforación, incluyendo carga axial y cortante. Obtuvieron una curva empírica de interacción momento-cortante y desarrollaron una filosofía de diseño.

En 2004, Mohebkah (7) estudió los efectos de las perforaciones en el factor  $C_b$  y determinó que el factor  $C_b$  empleado en vigas sin perforaciones no puede ser



empleado en vigas de alma expandida. De esta manera propuso ecuaciones para el cálculo de  $C_b$  a partir de una esbeltez modificada.

En 2005, Mohebkhaha y Showkatib (8) estudiaron el efecto de la longitud de soporte lateral en las vigas de alma expandida, para flexión pura y simplemente apoyadas, propusieron una ecuación general para calcular la rigidez óptima,  $K_{opt}$ .

En 2006, Hoffman y otros (9) analizaron los tipos de falla a flexión en una viga de alma expandida con perforaciones circulares y encontraron tres tipos de falla, los cuales estaban relacionados con pandeo en el alma cercana a la conexión.

En 2008, Lagaros y otros (10) plantearon dos alternativas para el diseño estructural en 3D empleando elementos finitos y encontraron que la modelación con elementos tipo Shell es una buena aproximación. Wang y Chung (11) evaluaron el comportamiento estructural de una viga de alma expandida con perforaciones rectangulares trabajando en sección compuesta en grandes luces. Con los resultados obtenidos establecieron recomendaciones de diseño para los conectores de cortante y para el cálculo de la capacidad de carga de las vigas en sección compuesta. También, presentaron la distribución de esfuerzos y recomendaron las perforaciones rectangulares por su facilidad constructiva.

En 2009, Sweedan, El-Sawy y Martini (12) empleando el método de elementos finitos y teniendo en cuenta las deformaciones por flexión y cortante calcularon la capacidad de carga de una columna con perforaciones circulares. De esta manera establecieron una metodología para el diseño de las columnas.





En 2010, Erdal, Doğan y Saka (13) con el objetivo de obtener la viga de menor peso mediante la aplicación de los algoritmos *harmony search* and *particle swarm optimizers* construyeron un algoritmo para diseñar las vigas y obtener el diámetro ideal de la perforación, la cantidad optima de perforaciones y el menor peso. Sweedan (14) investigó la estabilidad lateral de vigas de alma expandida y encontró que el factor del momento  $C_b$  dependía de la configuración de las perforaciones. Además, estableció una metodología para calcular el momento crítico de pandeo lateral torsional en vigas con perforaciones circulares.

A pesar de todas las investigaciones realizadas a la fecha no existe una metodología de diseño regulada por ANSI/AISC o FEMA, sin embargo se espera que para el 2012 se realice la publicación de la monografía *Design of Castellated and Cellular Beams* (15) la cual está siendo actualmente revisada por un comité de la AISC.

### **2.1.2 Conexiones a Momento Viga-Columna**

Las metodología de diseño y construcción de las conexiones en pórticos resistentes a momento tuvieron un cambio trascendental después del sismo ocurrido en Northdrige-1994, ya que una gran cantidad de estructuras metálicas colapsaron y otras sufrieron importantes daños debido a la incipiente capacidad de rotación de la conexión viga-columna y a mecanismos de fluencia que no garantizaban la filosofía columna fuerte viga débil (16).

Por lo tanto, con la nueva filosofía de diseño posterior el sismo de Northdrige-1994, se pretende garantizar que el inicio de la fluencia y la rótula plástica se produzca en la viga evitando de esta manera fallas inesperadas en la zona del panel de la

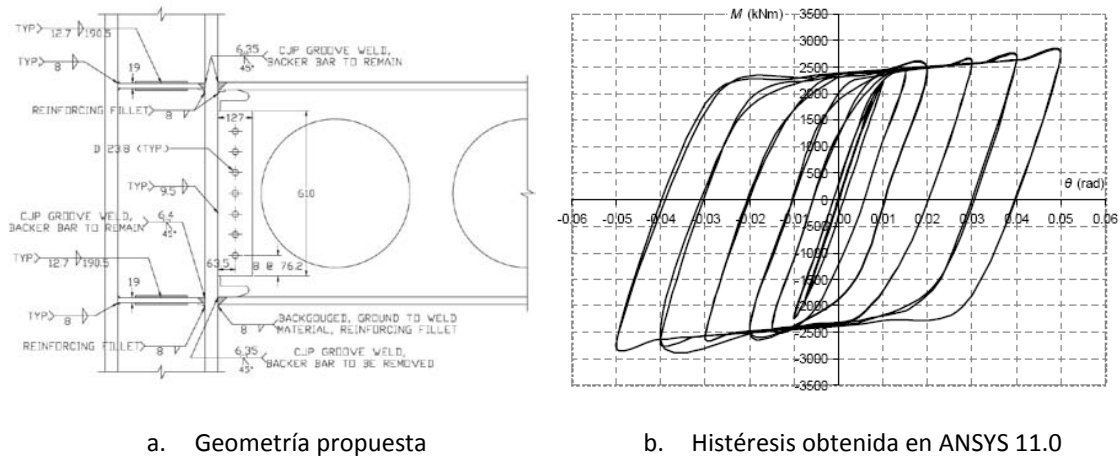


columna o en las soldaduras de demanda crítica, la Figura 14 muestra el mecanismo de fluencia esperado en un pórtico resistente a momento.

Por otra parte, las conexiones a momento entre elementos de alma expandida no han tenido mayores desarrollos a los alcanzados en 1997 cuando Aschheim (17) patentó una metodología de diseño para la conexión a momento viga-columna de elementos con perforaciones en el alma. En esta patente se planteó que la forma, ubicación y tamaño de las perforaciones en el alma de las vigas garantiza que, bajo esfuerzos críticos, se produzcan zonas de disipación que se deforman inelásticamente actuando como un fusible y evitando fallas de la conexión en las soldaduras y en las zonas afectadas térmicamente.

Recientemente, su publicó en el congreso del 2010 de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles-ASCE, un avance del estudio llamado *Comportamiento sísmico de conexiones de vigas celulares en pórticos resistentes a momento* (18), realizado en la universidad de Villanova, Estados Unidos. En esta investigación se construyeron modelos de elementos finitos de la conexión tipo WUF–W mostrada en la Figura 13a encontrando que la capacidad de rotación de la conexión es superior a 0.04 radianes, Figura 13b. Sin embargo, a la fecha no se han reportado resultados de los ensayos a los prototipos.

**Figura 13. Esquema de Conexión propuesta Universidad de Villanova**



## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

Los conceptos que se describen a continuación hacen parte de las teorías desarrolladas para el diseño de conexiones a momento y de las vigas de alma expandida y tendrán relevancia en el desarrollo de la presente investigación.

*Capacidad de disipación de energía:* Es la capacidad que tiene un sistema estructural, un elemento estructural o una sección de un elemento estructural, de trabajar dentro del rango inelástico de respuesta sin perder su resistencia.

*Conexión a momento parcialmente restringida PR:* Conexión que transmite momento, sin que sea despreciable la rotación entre los elementos conectados.

*Conexión a momento totalmente restringida TR:* Conexión capaz de transferir momento con una rotación despreciable entre los elemento conectados



*Elemento de alma expandida:* Perfil metálico soldado y con perforaciones en el alma, de mayor rigidez e igual peso que el perfil de alma llena que lo originó.

*Pandeo lateral torsional:* Modo de pandeo de un elemento solicitado por flexión en el cual ocurren simultáneamente un desplazamiento normal al plano de flexión y una torsión alrededor del centro de cortante de la sección transversal.

*Pandeo del alma:* Estado límite de inestabilidad lateral del alma

## **2.3 MARCO TEÓRICO**

### **2.3.1 Pórticos resistentes a momento**

Según NSR-10 (19) los Pórticos Resistentes a Momento con capacidad de disipación de energía especial PRM-DES, deben ser capaces de desarrollar una capacidad de deformación inelástica significativa a partir de la fluencia por flexión de las vigas y una fluencia limitada por cortante de la zona de panel. Adicionalmente, las columnas deben diseñarse para ser más fuertes que las vigas en fluencia completa y con endurecimiento por deformación, permitiéndose la fluencia por flexión de las columnas en la base. El diseño de las conexiones vigas-columna, incluyendo la zona de panel y sus placas de continuidad, debe basarse en ensayos que garanticen:

1. La conexión debe ser capaz de soportar un ángulo de deriva de piso mínimo de 0.04 radianes.
2. La resistencia medida a flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos **0.8Mp** (Momento de plastificación) de la viga conectada a un ángulo de deriva de piso de 0.04 radianes.

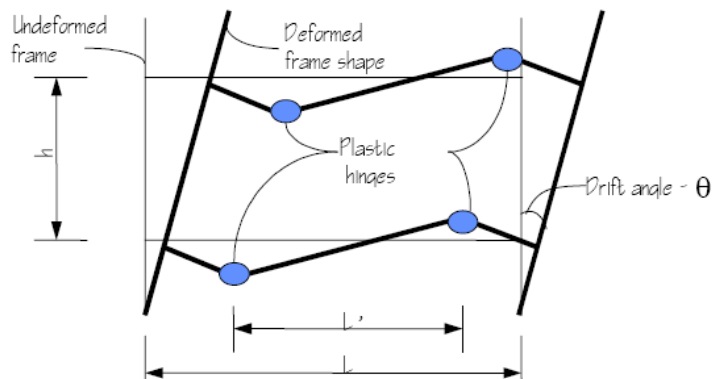


En el caso de Pórticos Resistentes a Momento con capacidad de disipación de energía moderada PRM-DMO, el diseño de las conexiones vigas-columna, incluyendo la zona de panel y sus placas de continuidad, debe basarse en ensayos que garanticen:

1. La conexión debe ser capaz de soportar un ángulo de deriva de piso mínimo de 0.02 radianes.
2. La resistencia medida a flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos  $0.8M_p$  de la viga conectada a un ángulo de deriva de piso de 0.02 radianes.

En la Figura 14 muestra el ángulo de deriva de piso para una conexión a momento viga-columna (20).

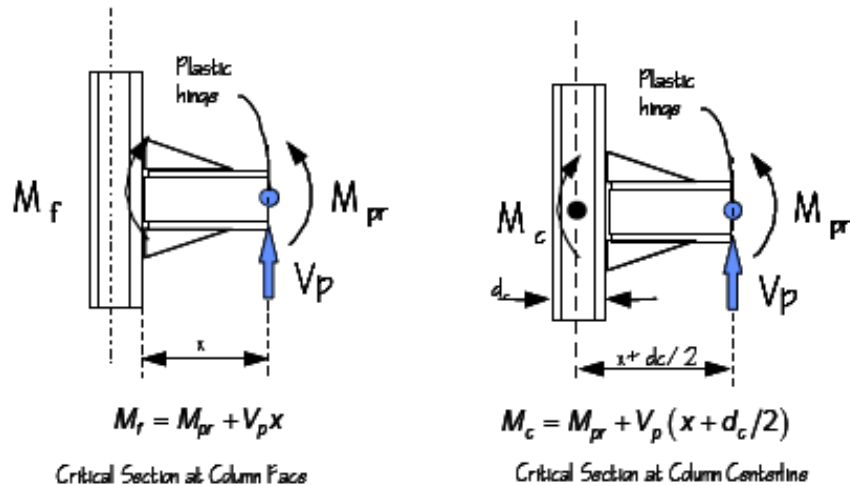
Figura 14. Comportamiento Inelástico de un pórtico con articulaciones plásticas





Las conexiones a momento totalmente restringidas TR deben ser capaces de resistir los esfuerzos que se liberan después de producidas las articulaciones plásticas en las vigas. Ver Figura 15.

Figura 15. Esfuerzos en las secciones críticas de la conexión



En cuanto a los momentos se debe tener en cuenta el Momento de plastificación probable  $M_{pr}$  el cual se define a continuación:

$$M_{pr} = C_{pr} R_y Z_e F_y \quad [2-1]$$

Siendo,

$C_{pr}$  = factor que incluye el endurecimiento por deformación, restricciones locales y refuerzo adicional que aumentan el pico de esfuerzos en la conexión. Según (19)  $C_{pr} = 1.1$ , pero en general se puede calcular como:

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \quad [2-2]$$

$R_y$  = relación entre el esfuerzo de fluencia esperado y el mínimo especificado

$Z_e$  = modulo plástico efectivo de la sección donde se produce la rótula plástica

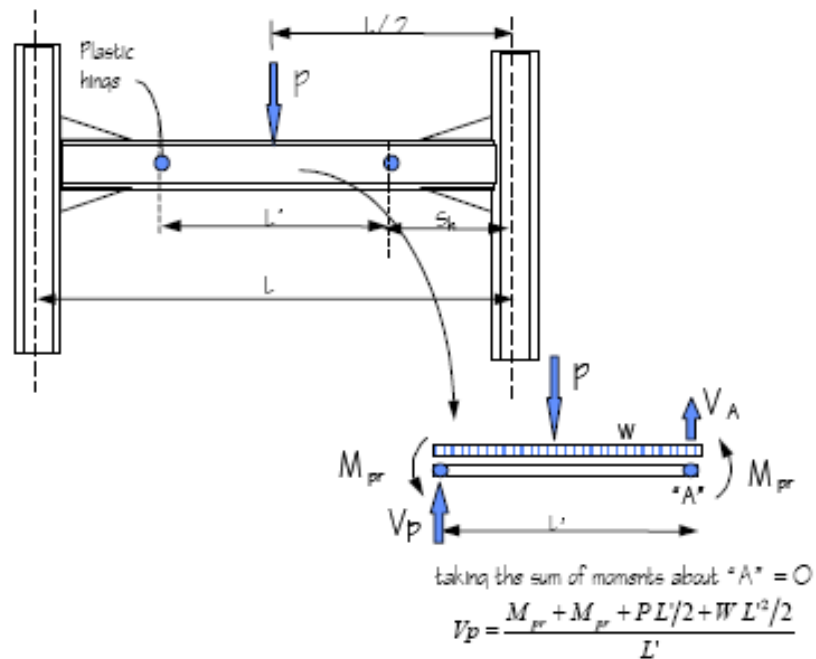
$F_y$  = resistencia mínima de fluencia del material

$F_u$  = resistencia mínima especificada a tensión

El cálculo de la cortante de plastificación probable se muestra en la Figura 16 y se define como:

$$V_{pr} = \frac{2M_{pr} + \frac{PL'}{2} + \frac{WL'^2}{2}}{L'} \quad [2-3]$$

Figura 16. Cálculo de la cortante de plastificación



Una vez estimados los valores de  $M_p$ ,  $M_{pr}$ ,  $V_p$  y  $V_{pr}$  tanto para la viga como para la columna se debe verificar los siguientes estados límites (16):

- Fluencia en la viga, relación columna fuerte viga débil.



$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0 \quad [2-4]$$

Donde,

$\sum M_{pc}^*$  = suma de las proyecciones del eje de la viga, de la resistencia nominal a flexión de las columnas (incluidas las ménsulas si estas se utilizan) arriba y debajo de la unión, con una reducción debida a la fuerza axial de la columna. Se puede calcular como:

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc}/A_g) \quad [2-5]$$

Cuando los ejes de vigas opuestas en la misma conexión no coincidan se debe utilizar la línea intermedia entre ejes.

$\sum M_{pb}^*$  = suma de las proyecciones al eje de la columna de las resistencias esperadas a flexión de las vigas en la rótula plástica. Se puede calcular como:

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y F_{yb} Z_b + M_{uv}) \quad [2-6]$$

$A_g$  = área bruta de la columna, mm<sup>2</sup>

$F_{yc}$  = esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la columna, MPa

$M_{uv}$  = momento adicional en el eje de la columna debido a la amplificación por el cortante desde la rótula plástica hasta el eje de la columna, N-mm

$P_{uc}$  = resistencia a la compresión requerida (valor absoluto), N

$Z_b$  = módulo de sección plástico de la viga, mm<sup>3</sup>

$Z_c$  = módulo de sección plástico de la columna, mm<sup>3</sup>





- Pandeo flexo torsional, Arriostramiento para estabilidad de la viga.

El arriostramiento de la viga debe estar espaciado como máximo una distancia  $L_b$ ,

$$L_b = 0.17r_y E / F_y \quad [2-7]$$

- Cortante en la zona del panel, placas de enchape.

Espesor de la zona de panel. Los espesores individuales,  $t$ , de las almas de la columna y placas de enchape, en caso de utilizarse, deben cumplir el siguiente requisito:

$$t \geq (d_z + w_z) / 90 \quad [2-8]$$

Donde,

$t$ = espesor del alma de la columna o de la placa de enchape, mm

$d_z$ = altura de la zona de panel entre placas de continuidad, mm

$w_z$ = ancho de la zona de panel entre aletas de columna, mm

Las placas de enchape deben colocarse directamente en el alma de la columna cuando el alma no cumpla con la ecuación [2-8]. De otra forma las placas pueden conectarse directamente al alma de la columna, o separadas del alma.

Las placas de enchape en contacto con el alma deben soldarse a las aletas de la columna por medio de las soldaduras acanaladas de penetración completa o soldaduras de filete que sean capaces de desarrollar toda la resistencia de diseño a cortante de las placas de enchape. Cuando no se usen placas de continuidad, las placas de enchape deben ser unidas con soldadura de filete a lo largo de la parte



superior e inferior para desarrollar la porción de la fuerza total que se transmita a la placa de enchape a menos que las placas de enchape y el alma cumplan con la ecuación[2-8].

Las placas de enchape separadas del alma deben colocarse en pares simétricos localizadas en 1/3 y 2/3 de la distancia entre el borde de la aleta de la viga y el eje de la columna, y deben ser unidas con una soldadura acanalada de penetración completa a las aletas de la columna de tal manera que se desarrolle la resistencia de diseño completa de las placas de enchape.

En las placas de enchape con placas de continuidad, cada placa de enchape debe soldarse a las placas de continuidad para desarrollar la porción de la fuerza total que transmiten las placas de enchape.

- Pandeo local en el patín de la columna, placas de continuidad.

Cuando la aleta de la viga esté soldada a la aleta de una columna laminada o armada con sección **I** que tenga un espesor que satisfaga las siguientes ecuaciones, no se requieren placas de continuidad.

$$t_{cf} > 0.4 \sqrt{1.8 b_{bf} t_{bf} \frac{F_{yb} R_{yb}}{F_{yc} R_{yc}}} \quad [2-9]$$

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6} \quad [2-10]$$

Donde,

$t_{cf}$ = espesor mínimo requerido de la aleta de la columna cuando no se colocan placas de continuidad, mm

$b_{bf}$ = ancho de la aleta de la viga, mm

$t_{bf}$ = espesor de la aleta de la viga, mm



$F_{yb}$ = esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la aleta de la columna, MPa

$R_{yb}$ = relación del esfuerzo de fluencia esperado del material de la viga y el esfuerzo de fluencia mínimo especificado

$R_{yc}$ = relación del esfuerzo de fluencia esperado del material de la columna y el esfuerzo de fluencia mínimo especificado.

- Mecanismo de fluencia de la conexión.

Debido a que el espesor de la zona del panel afecta considerablemente la capacidad de rotación de la conexión, se debe buscar un balance entre la fluencia de la viga y de la zona del panel (16). Por lo tanto con los resultados definitivos del diseño se realiza un chequeo del mecanismo de fluencia esperado en la conexión. El chequeo consiste en calcular la cortante de fluencia  $V_{pz}$  de la viga en la cara de la columna y compararla con la cortante de fluencia del panel  $V_y$ .

$$V_{pz} = \frac{\sum Mfy}{\left(Hs + \frac{tpi + tps}{2}\right)} \left(\frac{Lt}{Lt - Dc - 2Lp}\right) \left(\frac{Lc - Hs}{Lc}\right) \leq 0.9V_y = 0.9 * 0.55Dc * t_{zp} * F_{yc} \quad [2-11]$$

$$V_{pz} = \frac{\sum Mfy}{\left(Hs + \frac{tpi + tps}{2}\right)} \left(\frac{Lt}{Lt - Dc - 2Lp}\right) \left(\frac{Lc - Hs}{Lc}\right) \geq 0.6V_y = 0.6 * 0.55Dc * t_{zp} * F_{yc} \quad [2-12]$$

### 2.3.2 Vigas de alma expandida

Dado que la viga a emplear en esta investigación es *celular* nos concentraremos en la metodología de diseño para este tipo de viga. Adicionalmente, se incluye en el



Anexo A la metodología de diseño para las vigas tipo *casteladas* por esfuerzos admisibles (21).

La metodología que se describe a continuación está basada en el procedimiento de diseño descrito en “Design of composite and non composite cellular beam” publicación No. 100 del SCI-Steel Construction Institute (22) y el código británico BS5950. En ésta publicación se verifican la interacción flexión - cortante alrededor de las perforaciones, la capacidad a flexión de la sección total, la capacidad a cortante, la capacidad de pandeo de la sección total, la flexión y pandeo del alma entre perforaciones, la flexión por efecto Vierendeel en la tee inferior y superior, el pandeo local en el patín a compresión.

Los detalles de geometría y notaciones usadas se muestran en la Figura 2. Se recomienda usar las siguientes relaciones para el dimensionamiento de la viga.

$$1.08 < \frac{S}{D_0} < 1.5 \quad [2-13]$$

$$1.25 < \frac{H_S}{D_0} < 1.75 \quad [2-14]$$

- Capacidad a flexión de la sección total.

El máximo momento  $M_U$  bajo las combinaciones de carga aplicadas no debe exceder la capacidad a momento plástico  $M_p$  de la viga celular.

$$M_U \leq M_p = A_{ts} P_Y h_U \quad [2-15]$$

Donde

$A_{ts}$  = es el área de la tee inferior

$h_U$  = es la distancia entre los centroides de la tee inferior y superior



$P_Y$  = es la resistencia a fluencia del acero y se puede calcula como:

$$P_Y = \begin{cases} f_y & \text{si } f_y \leq 0.84F_u \\ 0.84F_u & \text{si } f_y > 0.84F_u \end{cases}$$

- Capacidad a cortante.

Es necesario chequear dos fallas a cortante en las vigas celulares. La primera es la capacidad a cortante vertical en la viga, que se calcula como la suma de las capacidades a cortante vertical de la tee superior e inferior, definida como  $P_{VY}$ .

$$P_{VY} = 0.6P_Y(0.9A_{WUL}) \quad [2-16]$$

El siguiente chequeo a cortante es el horizontal. La cortante horizontal es desarrollada en el alma entre las perforaciones, debido al cambio en las fuerzas axiales en la tee mostrada en la Figura 17. La capacidad a cortante horizontal en el alma entre las perforaciones no debe exceder  $P_{VH}$ .

$$P_{VH} = 0.6P_Y(0.9A_{WP}) \quad [2-17]$$

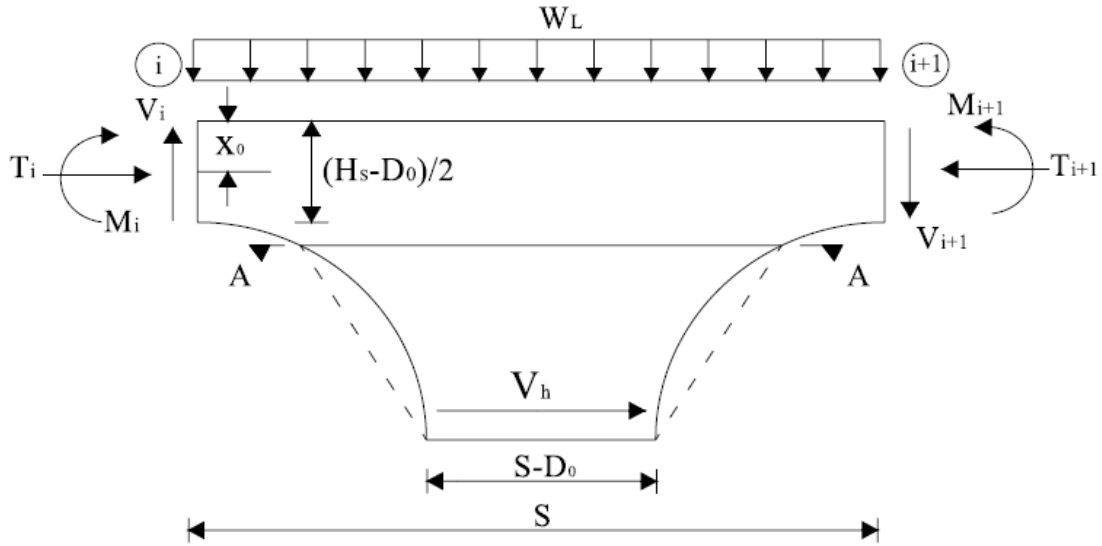
Donde,

$A_{WUL}$  = es la suma de las áreas de las almas en la tee superior e inferior

$A_{WP}$  = es la menor área en el alma entre las perforaciones



Figura 17. Cortante horizontal en el alma entre perforaciones



Despreciando el efecto de las cargas aplicadas y teniendo en cuenta las condiciones de equilibrio vertical y la variación del momento flector se pueden escribir las siguientes ecuaciones (ver Figura 17).

$$V_{i+1} = V_i \quad [2-18]$$

$$M_i = T_i(H_s - 2x_0) \quad [2-19]$$

$$V_{i+1} = \frac{dM}{dx} = \frac{M_{i+1} - M_i}{S} \quad [2-20]$$

Sustituyendo  $M_i$

$$V_{i+1} = (T_{i+1} - T_i) \frac{(H_s - 2x_0)}{S} \quad [2-21]$$

Teniendo en cuenta el equilibrio horizontal:

$$V_H = T_{i+1} - T_i = V_{i+1} \frac{S}{H_s - 2x_0} \quad [2-22]$$



Donde

$V$  = fuerza cortante

$T$  = carga axial

$M$  = momento flector de la sección transversal

$S$  = separación entre perforaciones centro a centro

$x_0$  = distancia de la cara superior del patín de la viga al centroide de la tee superior.

- Flexión y capacidad de pandeo del alma entre perforaciones.

Para  $L_b = 0$ , asumiendo el patín a compresión totalmente restringido, la capacidad a flexión y de pandeo se verifica empleando la siguiente relación:

$$\frac{M_{MAX}}{M_E} = \left[ C_1 \left( \frac{S}{D_0} \right) - C_2 \left( \frac{S}{D_0} \right)^2 - C_3 \right] \quad [2-23]$$

Donde:

$M_{MAX}$  = momento máximo admisible del alma entre perforaciones

$M_E$  = capacidad elástica de la sección en el corte A-A del alma entre perforaciones mostrada en la Figura 17.  $M_E$  se calcula usando la resistencia de fluencia  $P_Y$ .

En esta ecuación  $D_0$  y  $S$  se deben ingresar en mm.  $C_1$ ,  $C_2$ , y  $C_3$  son constantes calculadas como sigue:

$$C_1 = 5.097 + 0.1464 \left( \frac{D_0}{t} \right) - 0.00174 \left( \frac{D_0}{t} \right)^2 \quad [2-24]$$

$$C_2 = 1.441 + 0.0625 \left( \frac{D_0}{t} \right) - 0.000683 \left( \frac{D_0}{t} \right)^2 \quad [2-25]$$

$$C_3 = 3.645 + 0.0853 \left( \frac{D_0}{t} \right) - 0.00108 \left( \frac{D_0}{t} \right)^2 \quad [2-26]$$

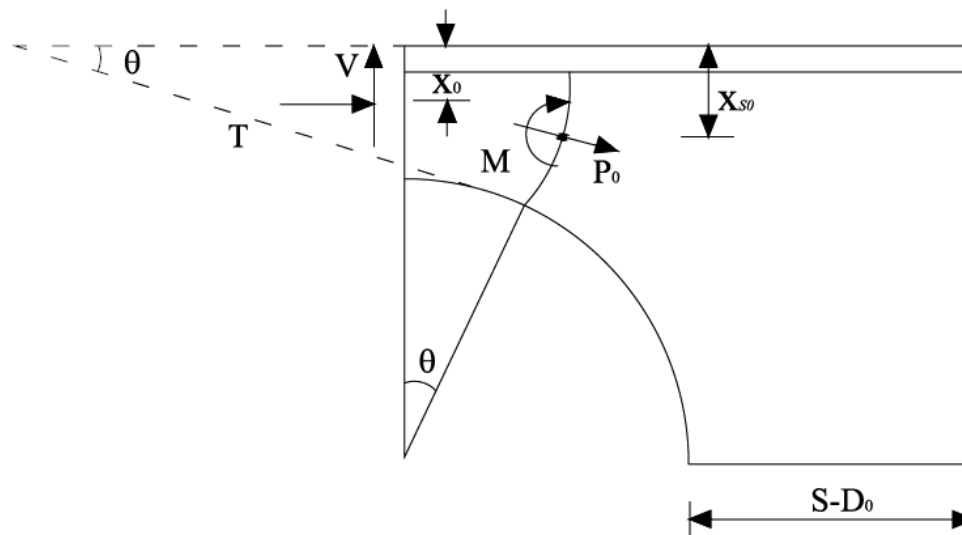
Donde  $t = t_w$ , espesor del alma.



- Flexión tipo Vierendeel de la tee superior e inferior

La transmisión de las cargas de cortante a través de una perforación causa esfuerzos de flexión secundarios, siendo crítica la capacidad a flexión de la tee superior e inferior bajo el efecto Vierendeel. El efecto de los esfuerzos de flexión a través de las perforaciones se calcula con el método de Olander, el cual utiliza una sección circular para la posición de la sección crítica y de la resistencia última de la tee mostrada en la Figura 18.

**Figura 18. Sección crítica de Olander**



En una sección simétrica la cortante es resistida por el alma de la sección superior e inferior en una proporción igual a su altura al cuadrado, además la cortante se distribuye entre el alma de la sección superior e inferior. La interacción entre el momento flector  $Vierendeel$  y la fuerza axial para la sección crítica en la tee se debe verificar con la siguiente relación:

$$\frac{P_O}{P_{II}} + \frac{M}{M_P} \leq 1.0 \quad [2-27]$$

$$P_o = T \cos \theta - \frac{V}{2} \sin \theta \quad [2-28]$$





$$M = T(x_{s0} - x_0) + \frac{V}{2} \left( \frac{H_s}{2} - X_{s0} \right) \quad [2-29]$$

Donde

$P_0$  = fuerza en cada sección

$M$  = momento a flexión en cada sección.

$P_u$  = área de la sección crítica multiplicada por  $P_Y$ .

$M_p$  = es calculado en la zona de plastificación como el producto entre  $P_Y$  y el módulo plástico de la sección crítica y en las demás zonas como el producto entre módulo elástico de la sección crítica por  $P_Y$ .

#### - Deflexiones

La deflexión de una viga celular se calcula usando el método de trabajo virtual explicado en detalle en (22). La Figura 17 muestra los puntos de inflexión en las secciones  $i$ ,  $i + 1$ . La fuerza cortante mayorada es distribuida entre la tee superior e inferior, las fuerzas horizontales y verticales en estas tees se calculan como:

$$T_i = \frac{M_i}{h_U} \quad V_h = \frac{s(V_i + V_{i+1})}{2h_U} \quad [2-30]$$

Donde

$h_U$  , definida en la ecuación [2-15] es la distancia entre los centroides de la tee superior e inferior. La deflexión de cada punto se encuentra aplicando una fuerza unitaria en cada punto. Las fuerzas internas producidas por la carga unitaria se definen como  $\frac{\bar{V}_i}{2}$ ,  $\bar{N}_i$ ,  $\bar{V}_H$ .

La deflexión producida por el momento flector en la tee es:

$$y_{MT} = \frac{0.091(D_0/2)^3}{3E I_T} (V_i \bar{V}_i) \quad [2-31]$$



La deflexión producida por el momento flector en el alma entre perforaciones es:

$$y_{WP} = \frac{13.15}{E t_W} \left[ \log_e \left( \frac{S-0.9(D_0/2)}{S-2.0(D_0/2)} \right) + 2 \left( \frac{S-2.0(D_0/2)}{S-0.9(D_0/2)} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{S-2.0(D_0/2)}{S-0.9(D_0/2)} \right)^2 - \frac{3}{2} \right] V_H \bar{V}_H \quad [2-32]$$

La deflexión producida por la carga axial en la tee es:

$$y_{AF} = \frac{2S}{E A_T} (T_i \bar{T}_i) \quad [2-33]$$

La deflexión producida por la cortante en la tee es:

$$y_{ST} = \frac{0.45(D_0/2)}{G A_{TWEB}} (V_i \bar{V}_i) \quad [2-34]$$

La deflexión producida por el cortante en el alma entre perforaciones es:

$$y_{SWP} = \frac{1.636}{G t_W} X \log_e \left( \frac{S-0.9(D_0/2)}{S-2.0(D_0/2)} \right) V_H \bar{V}_H \quad [2-35]$$

Donde

$E$  = es el modulo de elasticidad del acero

$I_T$  = es el momento de inercia total de la viga

$G$  = es el modulo a cortante del acero

$X$  = es el factor de forma del alma entre perforaciones



La deflexión total de una sola perforación bajo las cargas aplicadas se obtiene sumando las deflexiones obtenidas en [2-31] a [2-35], según se muestra a continuación:

$$y_{TOTAL} = y_{MT} + y_{WP} + y_{AT} + y_{ST} + y_{SWP} \quad [2-36]$$

Por lo tanto, la deflexión total de la viga se calcula multiplicando la deflexión total en cada perforación por la cantidad total de perforaciones en la viga,  $n_p$ .

$$y_{VIGA} = n_p y_{TOTAL} \quad [2-37]$$

## **2.4 MARCO JURÍDICO**

Las provisiones sísmicas del actual Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 exigen que las conexiones a momento en las zonas de amenaza sísmica alta e intermedia deban tener un nivel especial y moderado de disipación de energía respectivamente. Por esta razón sólo se permite el uso de las conexiones descritas en ANSI/AISC 358-05 *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications* o de las que hayan sido precalificadas siguiendo los procedimientos del título F.3.11. y así garantizar el desempeño requerido y demostrar su conformidad con respecto a los límites establecidos.

Adicionalmente se pueden encontrar conexiones precalificadas en el capítulo 3 de la Federal Emergency Management Agency, FEMA-350/2000.

Sin embargo, las conexiones a momento precalificadas con elementos de alma expandida no se muestran en ANSI/AISC 358-05 ni en FEMA-350/2000. En esta última se limitan a resaltar la configuración de las perforaciones y su relación con la



capacidad de controlar el mecanismo de fluencia y los esfuerzos de fluencia en PRM y menciona la patente Estadounidense 6,012,256 (15).



### 3 DISEÑO DE LA CONEXIÓN

#### 3.1 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

##### 3.1.1 Viga de alma expandida

Con el fin de obtener resultados representativos de una viga que pueda ser empleada en una cubierta de grandes luces, se realizó el diseño para una viga celular de cubierta simplemente apoyada en una luz de 20m. Para este diseño se empleó el Software ACB+ 2.04 desarrollado por ArcelorMittal (23) que emplea la metodología presentada en el capítulo 2.3.2. Las memorias de cálculo del diseño se pueden observar en el anexo B.

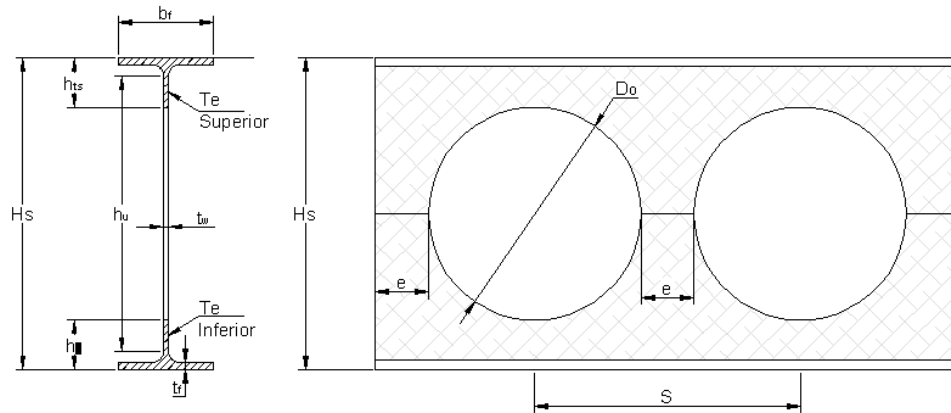
Figura 19. Viga celular luz=20m



Como parámetro inicial del diseño se estableció que el perfil base fuera IPE400, dado que con este perfil se han realizado calificaciones de conexiones Acero,2005 (24) y Ceron,2011 (25) y puede ser útil para comparar algunos resultados. Los parámetros de la viga celular obtenida se muestran en la Figura 20. La calidad de acero de los perfiles empleados fue ASTM A572-grado50.



Figura 20. Parámetros viga celular empleada



Hs	585.6	Altura Total Viga Expandida,(mm)
tw	8.6	Espesor del alma,(mm)
bf	180	Ancho del patin,(mm)
tfv	13.5	Espesor del patin,(mm)
hts	92.7	Altura Te superior,(mm)
hti	92.7	Altura Te inferior,(mm)
Do	400	Diametro perforacion,(mm)
e	100	Ancho del alma entre perforaciones,(mm)
S	500	Separación entre perforaciones,(mm)
Ycts	17	Centroide Te superior,(mm)
hu	551.6	Distancia Centroides Te Sup. Te Inf.,(mm)
Wgve	62.25	Peso por unidad de longitud, (kg/m)
Ati = Ats	3300	Area transversal Te inf. y sup.,(mm <sup>2</sup> )
r	21	radio de curvatura entre alma y patín,(mm)
Fyb	345	Esfuerzo de fluencia, (MPa)
Fub	450	Esfuerzo de último, (MPa)
E	200000	Módulo de Elasticidad, (MPa)

Las dimensiones obtenidas de la viga celular cumplen con las relaciones recomendadas en las ecuaciones [2-13] y [2-14] siendo:

$$\frac{S}{D_0} = 1.25 \quad \frac{H_s}{D_0} = 1.46$$



Para determinar el incremento en la rigidez, se calcula la inercia de la sección total  $I_T$ , la inercia de la sección neta  $I_N$  y se emplea el menor valor. Como ya se mencionó el perfil base empleado fue IPE400.

$$I_{xT} = 5.507 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_{xN} = 5.048 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_{xIPE400} = 2.31 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

Por lo tanto el aumento en la rigidez de la viga celular es del orden del 46%. Los módulos plásticos obtenidos para la sección total  $Z_{xT}$ , la sección neta  $Z_{xN}$  y la promedio  $\bar{Z}_{xb}$ , se muestran a continuación:

$$Z_{xT} = 2.165 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$Z_{xN} = 1.82 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\bar{Z}_{xb} = 1.993 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$Z_{xIPE400} = 1.307 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

El aumento en el módulo plástico de la viga celular es del orden del 40%. Los módulos elásticos obtenidos para la sección total  $S_{xT}$ , la sección neta  $S_{xN}$  y la promedio  $\bar{S}_{xb}$ , se muestran a continuación:

$$S_{xT} = 1.881 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$S_{xN} = 1.724 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\bar{S}_{xb} = 1.802 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$S_{xIPE400} = 1.156 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

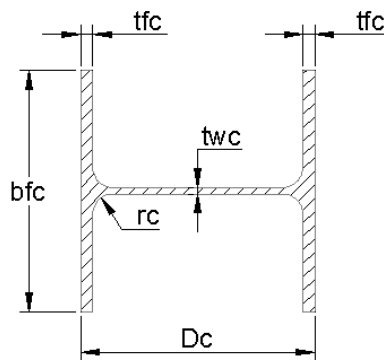


El aumento en el módulo elástico de la viga celular es del orden del 49%.

### 3.1.2 Columna

La perfil metálico empleado para la columna fue una HEA340 y su selección obedeció a que cumplía el criterio de columna fuerte viga débil formulado en el capítulo 2.3.1. La calidad del acero de la columna fue ASTM-A572grado50, en la Figura 21 se muestran las propiedades geométricas del perfil empleado.

**Figura 21. Geometría de la columna**



Dc	330	Altura de la columna,(mm)
twc	9.5	Espesor del alma,(mm)
bfc	300	Ancho del patín,(mm)
tfc	16.5	Espesor del patín,(mm)
rc	27	radio de curvatura entre alma y patín,(mm)
Ag	13300	Area transversal ,(mm <sup>2</sup> )
d	243	Altura del alma, (mm)
Zxc	1850000	Módulo plastico,(mm <sup>3</sup> )
Wgc	105	Peso por unidad de longitud, (kg/m)
Fyc	345	Esfuerzo de fluencia, (MPa)
Fuc	450	Esfuerzo de último, (MPa)
E	200000	Módulo de Elasticidad, (MPa)





### **3.1.3 Lamina HR**

Las láminas empleadas en la conexión fueron ASTM-A36 debido a su fácil comercialización.  $F_{yp} = 250MPa$  y  $F_u = 400MPa$

## **3.2 SELECCIÓN DE LA CONEXIÓN**

El proceso de selección de la conexión tuvo en cuenta los siguientes factores:

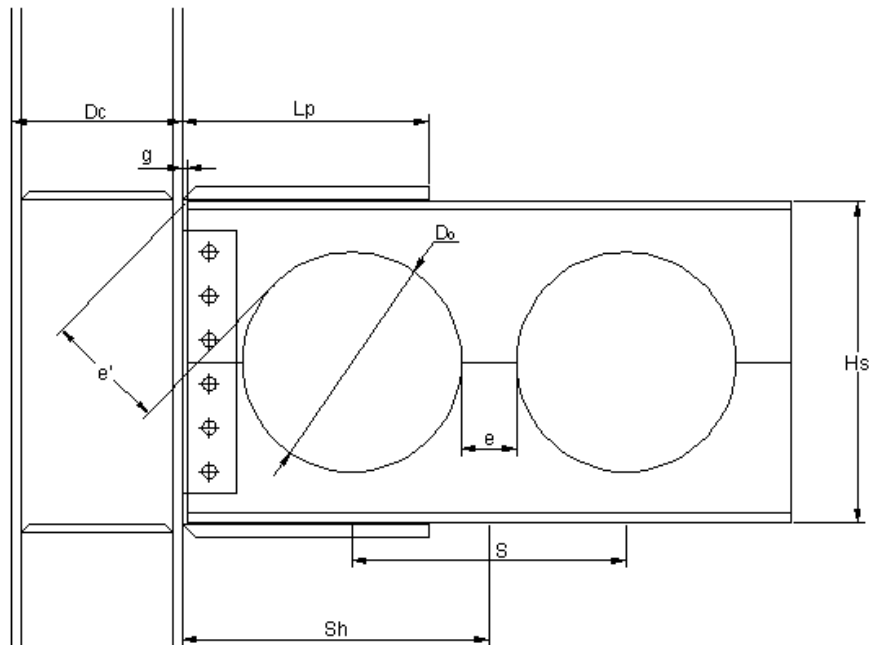
- Que la conexión haya tenido aplicaciones en PRM-DES con vigas de alma llena.
- Que tenga aplicación inmediata, es decir que sea construida con materiales comerciales en el país,
- Que sea de fácil construcción y económica.
- Que no tenga soldaduras especiales para aplicar en obra.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los factores mencionados se escogió una conexión a momento del tipo platabanda soldada a la columna y pernada en el alma similar a la presentada en el capítulo C3.5.4-FEMA350 (20). La Figura 22 muestra la geometría de la conexión.

Ésta es una conexión frecuentemente usada por los fabricantes de estructuras de la región debido a su fácil diseño, rápida fabricación y a que brinda mayores tolerancias en el montaje de la estructura. Al realizar la conexión del alma de la viga pernada se podrá dinamizar el proceso de montaje de las estructuras logrando también una reducción en el costo total del proyecto.



Figura 22. Conexión empleada



### 3.3 METODOLOGÍA DE DISEÑO EMPLEADA

La metodología de diseño empleada está basada en los requisitos del actual NSR-10 (19), y emplea recomendaciones ANSI/AISC358-05 (3) y de la FEMA-350 (20).

#### 3.3.1 Relaciones ancho espesor

Con el fin de garantizar que los elementos tengan la suficiente capacidad de incursionar en el rango inelástico sin antes presentar pandeos locales, se verifican las relaciones ancho-espesor para la viga y la columna (19):



Para la columna se tiene:

\* Patín de columna

$$\frac{b}{t} = \frac{b_{fc}}{2 * t_{fc}} < 0.3 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad [3-1]$$

$$\frac{300mm}{2 * 16.5mm} = 9.09 > 0.3 \sqrt{\frac{200.000MPa}{345MPa}} = 7.22 \therefore \text{nocumple!!}$$

Los patines no son sísmicamente compactos. Es importante tener en cuenta que son pocos los perfiles comerciales en Colombia que cumplen esta condición. Por lo tanto, se decidió continuar con el ensayo, pensando que con las placas de continuidad esta condición se pueda mejorar en la zona de la conexión

\* Alma de Columna

$$\frac{h}{t_w} = \frac{d}{t_{wc}} < 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} (1 - 0.93Ca) \quad [3-2]$$

$$Ca = \frac{P_u}{\phi_b P_y}$$

Asumiendo  $P_u=200.000N$  la carga que se espera sea transmitida en el ensayo.

$$Ca = \frac{200.000N}{0.9 * 345MPa * 13.300mm^2} = 0.0484$$



$$\frac{243mm}{9.5mm} = 25.58 < 2.45 \sqrt{\frac{200.000MPa}{345MPa}} (1 - 0.93 * 0.0484) = 56.3 \therefore \text{cumple!!}$$

Para la viga celular se tiene:

\* Patín de la viga

$$\frac{b}{t} = \frac{b_{fb}}{2 * t_{fb}} < 0.3 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}}$$

$$\frac{180mm}{2 * 13.5mm} = 6.67 < 0.3 \sqrt{\frac{200.000MPa}{345MPa}} = 7.22 \therefore \text{cumple!!}$$

\* Alma en Tee de la viga

$$\frac{d}{t_{wb}} = \frac{h_{ts}}{t_{wb}} < 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}}$$

$$\frac{92.7mm}{8.6mm} = 10.78 > 0.38 \sqrt{\frac{200.000MPa}{345MPa}} = 9.15 \therefore \text{Tee no compacta}$$

\* Alma de la viga

$$\frac{h}{t_w} = \frac{H_s - 2(r + t_{fb})}{t_{wb}} < 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} (1 - 0.93Ca)$$



$$\frac{516mm}{8.6mm} = 60.1 > 2.45 \sqrt{\frac{200.000MPa}{345MPa}} (1 - 0.93 * 0.0484) = 56.3 \therefore \text{No cumple!!}$$

Por lo tanto, con el fin de atiesar la zona de la conexión y alejar el pandeo local de la cara de la columna, se ubicarán atiesadores en forma de anillo en las dos primeras perforaciones. Estos atiesadores son sísmicamente compactos dado que cumplen la siguiente relación:

$$\frac{b}{t} = \frac{b_{at}}{2 * t_{at}} < 0.3 \sqrt{\frac{E}{f_{yat}}} = 8.49$$

$$\frac{80mm}{2 * 9mm} = 4.45 < 0.3 \sqrt{\frac{200.000MPa}{250 MPa}} = 8.49 \therefore \text{cumple!!!}$$

### 3.3.2 Cálculo de los momentos $M_p$ y $M_{pr}$

El momento plástico de la viga celular se tomará como el promedio entre el calculado para la sección total y la sección neta. Para la sección neta se emplea la ecuación [2-15].

$$M_{pb} = A_{ts} P_y h_U$$

$$M_{pb} = 3300mm^2 * 345Mpa * 552mm$$

$$M_{pb} = 6.28 \times 10^8 N.mm$$

Para la sección total de la viga celular, el cálculo de  $M_p$  es igual al esfuerzo de fluencia  $f_{yb}$  por el modulo plástico de la sección  $Z_{xb}$ .

$$M_{pb} = Z_{xb} f_{yb}$$

$$M_{pb} = 2.165 \times 10^6 mm^3 * 345 MPa$$



$$M_{pb} = 7.469 \times 10^8 N \cdot mm$$

El valor promedio  $\bar{M}_{pb}$  es igual:

$$\bar{M}_{pb} = 6.875 \times 10^8 N \cdot mm$$

El momento de plastificación probable  $M_{pr}$  se utiliza empleando la ecuación [2-1]

$$M_{pr} = C_{pr} R_y \bar{M}_{pb}$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} = \frac{345MPa + 450MPa}{2 * 345MPa} = 1.15$$

De acuerdo con el NSR-10 en la tabla F.3.1.4-1 el valor de  $R_y$  es igual a 1.1, puesto que el acero empleado es ASTM A572 grado 50.

Por lo tanto,

$$M_{pr} = 1.15 * 1.1 * 6.875 \times 10^8 N \cdot mm$$

$$M_{pr} = 8.713 \times 10^8 N \cdot mm$$

### 3.3.3 Momento de fluencia $M_{yf}$ de la viga en la cara de la columna

$$M_{yf} = C_y M_f \quad [3-3]$$

Donde,

$$C_y = \frac{1}{\left[ C_{pr} \frac{\bar{Z}_{xb}}{S_{xb}} \right]}$$



$$C_y = \frac{1}{\left[ 1.15 \frac{1.993 \times 10^6 \text{ mm}^3}{1.802 \times 10^6 \text{ mm}^3} \right]}$$

$$C_y = 0.785$$

$M_f$  = Momento plástico probable en la cara de la columna, calculado a partir de la ubicación de la rótula plástica.

$$M_f = M_{pr} + (V_{pr} * L_p)$$

$$M_f = 8.713 \times 10^8 \text{ N.mm} + (275.289 \text{ N} * 440 \text{ mm})$$

$$M_f = 9.924 \times 10^8 \text{ N.mm}$$

Reemplazando en la ecuación [3-3] se tiene:

$$M_{yf} = 0.785 * 9.924 \times 10^8 \text{ N.mm}$$

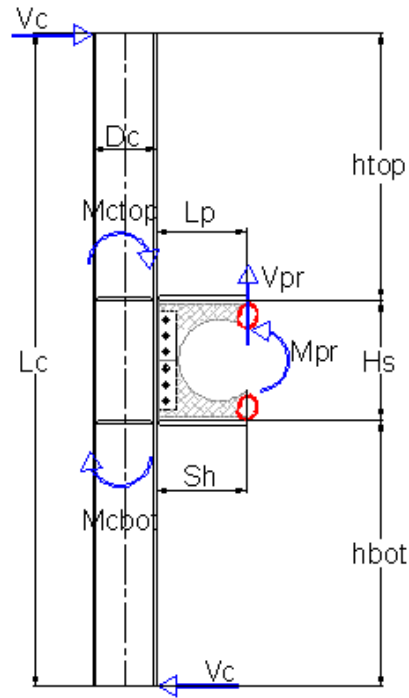
$$M_{yf} = 7.79 \times 10^8 \text{ N.mm}$$

### 3.3.4 Cálculo de las cubreplacas

La metodología empleada para calcular las cubreplacas está basada en FEMA-350 3.5.4.1. La longitud de las cubreplacas determina la localización de la rótula plástica siempre que la demanda a flexión producida por las cargas gravitacionales sea inferior al 30% de la capacidad plástica de la viga (20). A partir del diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 23 se puede determinar la máxima longitud de la cubreplaca  $L_p$  con la que se satisface la condición de columna fuerte viga débil.



Figura 23. Diagrama de cuerpo libre para  $L_p$



$$L_p < \frac{L_t}{2} - \frac{M_{pr}(L_t + D_c)(L_c - H_s)}{4Z_{xc}L_c(F_{yc} - \frac{p_u}{A_{gc}})}$$

$$L_p < \frac{7210mm}{2} - \frac{8.713 \times 10^8 N \cdot mm (7210mm + 330mm)(3000mm - 586mm)}{4 * 1.85 \times 10^6 mm^3 * 3000mm * (345MPa - \frac{200.000N}{13300mm^2})}$$

$$L_p < 1440mm$$

Se asume  $L_p < 440mm$  para ubicar el fin de la cubreplacas en un punto crítico sobre la primera perforación del alma de la viga.





Una vez determinada la longitud de la cubreplaca se emplea la ecuación [3-4] para calcular el espesor  $t_p$ . Debido a la diferente geometría de las cubreplacas, con el fin de que la soldadura en obra sea plana, se calculará un espesor  $t_{pi}$  para la cubreplaca inferior y  $t_{ps}$  para la cubreplaca superior.

$$t_p = \frac{M_{yf}}{F_{yp} b_p \left[ H_s + \frac{t_{plb} + t_{plt}}{2} \right]} \quad [3-4]$$

Para introducir en la formula [3-4] el valor de  $b_p$  se calcula como el ancho promedio de cada cubreplaca, ver Figura 24.

$$b_{ps} = \frac{300mm + 146mm}{2} = 223mm$$

$$b_{pi} = \frac{300mm + 210mm}{2} = 255mm$$

Reemplazando estos valores en la ecuación [3-4]

$$t_{pi} = \frac{7.79 \times 10^8 N \cdot mm}{250MPa * 255mm \left[ 586mm + \frac{25mm + 25mm}{2} \right]}$$

$$t_{pi} = 20mm$$

$$t_{ps} = \frac{7.79 \times 10^8 N \cdot mm}{250MPa * 223mm \left[ 586mm + \frac{25mm + 25mm}{2} \right]}$$

$$t_{ps} = 23mm$$

Aproximando a valores comerciales  $t_{pi} = t_{ps} = 25mm$



La longitud y tamaño del filete de soldadura aplicado entre la cubreplaca y el patín deben satisfacer la siguiente relación:

$$L_w t_w = \frac{M_f}{\phi 0,707 F_w \left( H_s + \frac{t_{ps} + t_{pi}}{2} \right)}$$

Donde la resistencia nominal de la soldadura  $F_w = 0.6 F_{EXX}$ , el factor de resistencia de la soldadura de filete  $\phi = 0.75$  y la resistencia mínima de la soldadura  $F_{EXX} = 483 MPa$  dado que el electrodo empleado fue E7018

Reemplazando se tiene:

$$L_w t_w = \frac{9.924 \times 10^8 N \cdot mm}{0.75 * 0.707 * 0.6 * 483 MPa (586 mm + 25 mm)}$$

Donde la longitud de la soldadura se puede ver en la Figura 24 para cada una de las cubreplacas.

$$L_{ws} = 825 mm$$

$$L_{wi} = 860 mm$$

Con  $L_{wi} = 860 mm$ ,  $t_w = 13 mm$  y para  $L_{ws} = 825 mm$ ,  $t_w = 15 mm$

Se realizó el chequeo a fluencia por tensión del material base empleando la siguiente ecuación:

$$L_p t_p = \frac{M_f}{\phi F_{yp} \left( H_s + \frac{t_{ps} + t_{pi}}{2} \right)}$$



Donde el factor resistencia  $\phi = 0.9$  y  $L_p = 440\text{mm}$

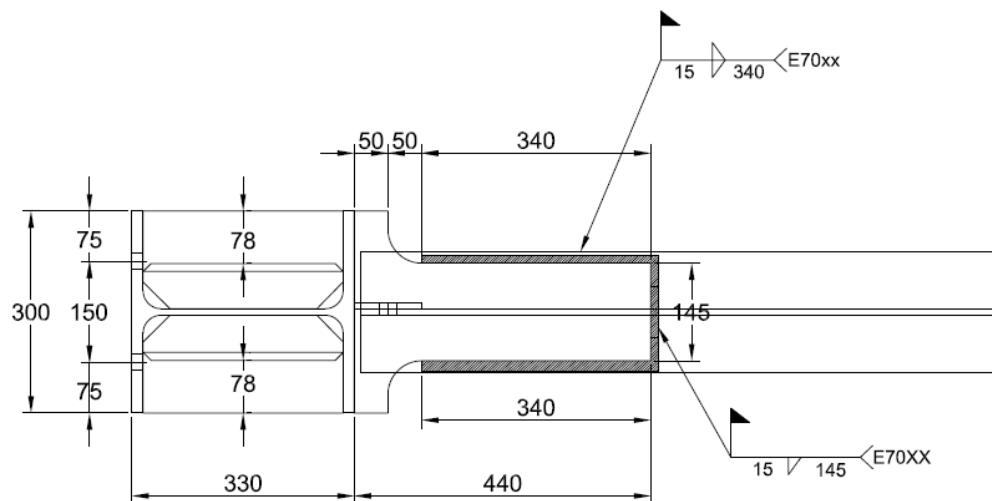
$$440\text{mm} * t_p = \frac{9.924 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}}{0.9 * 250\text{MPa}(586\text{mm} + 25\text{mm})}$$

$$t_p = 17\text{mm}$$

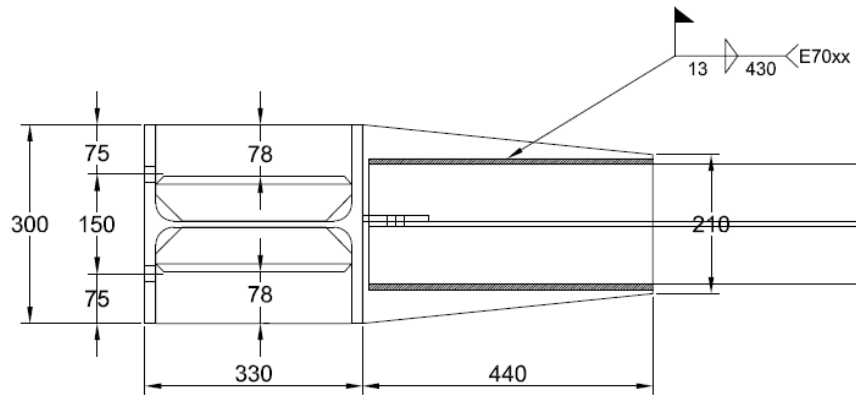
Por lo tanto el material base cumple por fluencia dado que

$$t_{pi} = t_{ps} = 25\text{mm} > 17\text{mm} \therefore \text{cumple!!!}$$

Figura 24. Cubreplacas de la conexión



a) Cubreplaca superior



b) Cubreplaca inferior

### 3.3.5 Verificación columna fuerte viga débil

Empleando la ecuación [2-5] se calcula la capacidad de la columna

$$\begin{aligned}\sum M_{pc}^* &= \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc}/A_g) \\ \sum M_{pc}^* &= 2 * [1.85 \times 10^6 (345 \text{ MPa} - 200.000 \text{ N}/13300 \text{ mm}^2)] \\ \sum M_{pc}^* &= 12.21 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}\end{aligned}$$

Para el cálculo de la capacidad de las vigas se emplea la ecuación [2-6].

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y F_{yb} Z_b + M_{uv})$$

Donde  $M_{uv}$  es el momento adicional en el eje de la columna debido a la amplificación por el cortante desde la rótula plástica hasta el eje de la columna.

$$M_{uv} = V_{pr} * (S_h + D_c/2) \quad [3-5]$$



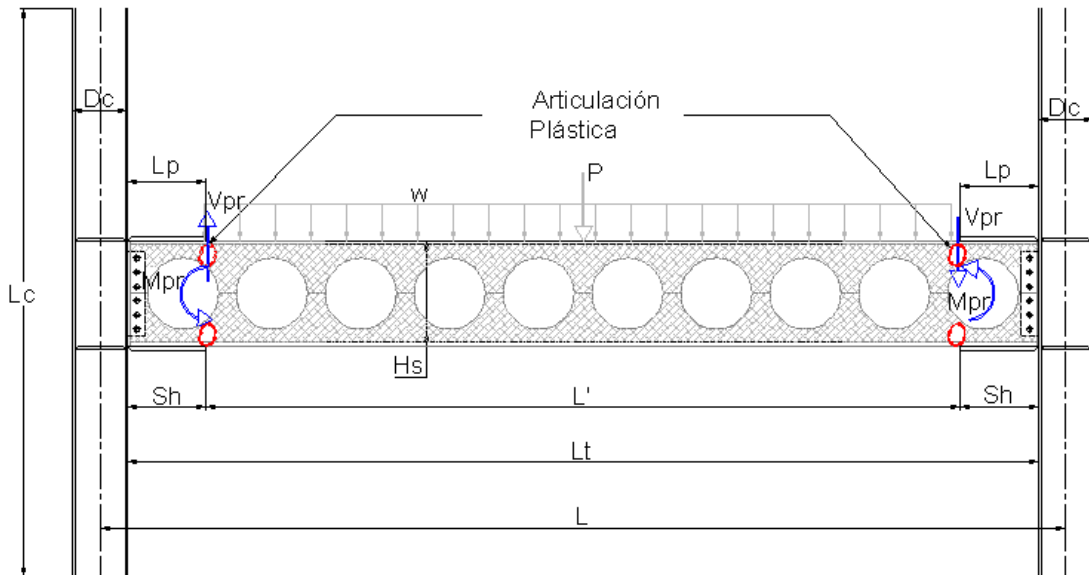
Empleando la Figura 25 la cual muestra el diagrama de cuerpo libre con la ubicación de la rotula plástica al final de las cubreplacas, se calcula la cortante de plastificación probable  $V_{pr}$  así:

$$V_{pr} = \frac{2M_{pr} + \frac{PL'}{2} + \frac{WL'^2}{2}}{L'}$$

Donde P y W son las cargas de gravedad (viva + muerta) actuantes sobre la estructura y se deben calcular con las combinaciones de carga apropiadas (20). Para los efectos del ensayo a realizar no se consideran las cargas P y W, por lo tanto el cálculo de la cortante de plastificación probable se simplifica así:

$$V_{pr} = \frac{2M_{pr}}{L'} \quad [3-6]$$

Figura 25. Localización estimada de  $V_{pr}$





De acuerdo con las condiciones del ensayo y las restricciones dimensionales del marco de prueba, se construyó el prototipo de la conexión con una columna de longitud entre puntos de apoyo,  $L_c=3000\text{mm}$  y una viga de  $3770\text{mm}$ , la cual representa una luz de  $L=7540\text{mm}$  entre ejes. Por lo tanto,  $L_t$  es igual a:

$$L_T = L - D_c$$

$$L_T = 7540\text{mm} - 330\text{mm}$$

$$L_T = 7210\text{mm}$$

Asumiendo que la rótula plástica se producirá al final de la cubreplacas,

$$S_h = L_p = 440\text{mm}$$

La longitud  $L'$  entre rótulas plásticas es igual a:

$$L' = L_T - 2(L_p)$$

$$L' = 7210\text{mm} - 2(440\text{mm})$$

$$L' = 6330\text{mm}$$

Por lo tanto, empleando la ecuación [3-6] se obtiene la cortante de plastificación probable.

$$V_{pr} = \frac{2 * 8.713 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{mm}}{6330\text{mm}}$$

$$V_{pr} = 275.289 \text{ N}$$



Reemplazando en la ecuación [3-5], se obtiene:

$$M_{uv} = 275.289N * (440mm + 330mm/2)$$

$$M_{uv} = 1.67 \times 10^8 N.mm$$

Sustituyendo  $V_{pr}$  y  $M_{uv}$ ,

$$\sum M_{pb}^* = 8.713 \times 10^8 N.mm + 1.67 \times 10^8 N.mm$$

$$\sum M_{pb}^* = 10.383 \times 10^8 N.mm$$

Sustituyendo en la ecuación [2-4] se obtiene:

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} = \frac{12.21 \times 10^8 N.mm}{10.383 \times 10^8 N.mm} = 1.18 > 1.0 \therefore \text{cumple!!!}$$

### 3.3.6 Chequeo de la zona del panel

En la conexión resistente a momento se debe garantizar que la fluencia ocurra en la viga o que el proceso de plastificación por cortante en el panel inicie al mismo tiempo que la plastificación por flexión en las vigas. Por lo tanto, según (20) para conseguir este balance se recomienda que el espesor de la zona del panel  $t$  sea:

$$t > \frac{C_y M_c \frac{l_c - H_s}{l_c}}{(0.9) 0.6 F_{yc} R_{yc} D_c [H_s - t_{fb}]}$$

$M_c$  = Momento plástico en el centro de la columna,  $M_c = \sum M_{pb}^*$



$$t = \frac{0.785 * 10.383 \times 10^8 N \cdot mm \frac{3000mm - 586mm}{3000mm}}{0.9 * 0.6 * 345 MPa * 1.1 * 330mm [3000mm - 13.5mm]}$$

$$t = 17mm$$

$$t_{wc} = 9.5mm < t \therefore \text{no cumple}$$

Se debe reforzar el alma empleando placas de enchape.

Adicionalmente, tanto el espesor del alma como el de las placas de enchape deben cumplir con la siguiente relación:

$$t \geq \left[ \frac{d_z + w_z}{90} \right]$$

Donde:

$d_z$  es la altura de la zona del panel entre las placas de continuidad

$w_z$  es el ancho de la zona del panel entre las aletas de la columna

$$d_z = 586mm$$

$$w_z = 243mm$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$t \geq \left[ \frac{586mm + 243mm}{90} \right]$$

$$t_{wc} = 9.5mm \geq t = 9.2mm \therefore \text{cumple!!!}$$





Dado que el espesor del alma de la columna es mayor a  $t$ , las placas de enchape se instalaron separadas del alma de la columna. Por lo tanto, se deben instalar dos placas de enchape, una a cada lado del alma con un espesor comercial superior a  $t$ . En este caso se emplean dos placas de enchape de 12mm,  $t_{pe} = 24mm$ . En la Figura 26 se muestran los detalles de ubicación de las placas teniendo en cuenta la recomendación expuesta en el capítulo 2.3.1.

$$t_{zp} = t_{wc} + t_{pe} = 9.5mm + 24mm$$

$$t_{zp} = 34mm$$

### 3.3.7 Chequeo platinas de continuidad

Las placas de continuidad se deben instalar en todas las conexiones (3), excepto cuando el espesor del patín de la columna tenga la suficiente resistencia que cumpla con:

$$t_{fc} \geq 0.4 \sqrt{1.8 b_{fb} t_{fb} \frac{f_{yb} R_{yb}}{f_{yc} R_{yc}}} \quad [3-7]$$

$$t_{fc} \geq \frac{b_{fb}}{6} \quad [3-8]$$

Verificando [3-7]

$$t_{fc} \geq 0.4 \sqrt{1.8 * 180mm * 13.5mm \frac{345MPa * 1.1}{345MPa * 1.1}} = 26mm$$



$$t_{fc} = 16.5 < 26\text{mm} \therefore \text{No cumple}$$

Verificando [3-8]

$$t_{fc} \geq \frac{180\text{mm}}{6} = 30\text{mm}$$

$$t_{fc} = 16.5 < 30\text{mm} \therefore \text{No cumple}$$

Por lo tanto se requiere platina de continuidad. El espesor de la placa de debe ser igual:

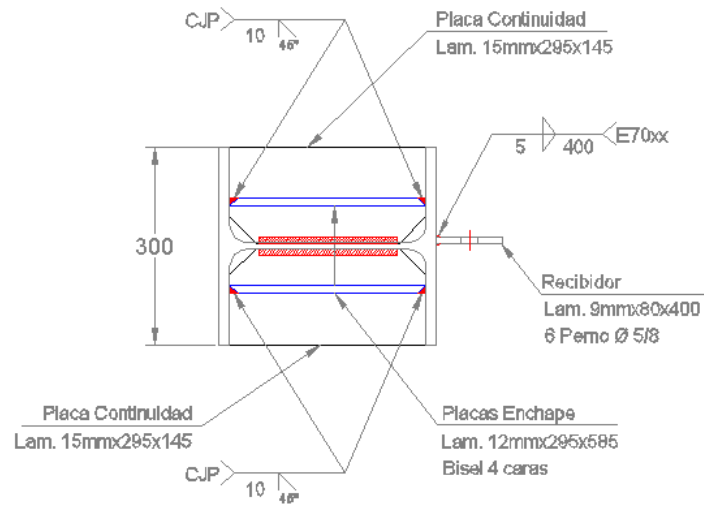
$$t_{pc} = \begin{cases} t_{pi} & \text{cuando llega viga en ambos lados de la columna} \\ \frac{t_{pi}}{2} & \text{cuando llega viga a un solo lado de la columna} \end{cases}$$

Donde  $t_{pi}$  es el espesor de la cubreplaca, en este caso se emplea  $\frac{t_{pi}}{2} = 12.7\text{mm}$ , por lo tanto, el espesor de la placa de continuidad se aproxima al siguiente valor comercial:

$$t_{pi} = 15\text{mm}$$



Figura 26. Placas de enchape y continuidad



### 3.3.8 Arriostramiento para estabilidad de la viga

Según NSR-10 F.3.4.1.2 se debe proporcionar arriostramiento lateral para vigas con alta ductilidad a una separación máxima calculada con la siguiente expresión:

$$l_b = 0.086r_y E / F_y$$

Donde  $r_y$  es el radio de giro mínimo de la viga  $r_y = \sqrt{I_{yN} / A_{Nb}}$  de la sección neta de la viga celular.

$$r_y = \sqrt{1.316 \times 10^7 \text{ mm}^4 / 6600 \text{ mm}^2}$$

$$r_y = 45 \text{ mm}$$

Reemplazando  $r_y$  en  $l_b$ :

$$l_b = 0.086 * 45 \text{ mm} * 200.000 \text{ MPa} / 345 \text{ MPa}$$

$$l_b = 2226 \text{ mm}$$



Este valor se tuvo en cuenta al realizar el ensayo para ubicar los arriostramientos laterales en el marco de prueba.

### 3.3.9 Mecanismo de fluencia esperado

Con el mecanismo de fluencia se quiere garantizar que la conexión tenga la suficiente capacidad de rotación dado que se busca balancear la plastificación de la viga con el inicio de la fluencia en la zona del panel.

$$V_{pz} = \frac{\sum Mfy}{\left(Hs + \frac{tpi + tps}{2}\right)} \left(\frac{Lt}{Lt - Dc - 2Lp}\right) \left(\frac{Lc - Hs}{Lc}\right) \leq 0.9V_y = 0.9 * 0.55Dc * tzp * Fyc$$

$$V_{pz} = \frac{\sum Mfy}{\left(Hs + \frac{tpi + tps}{2}\right)} \left(\frac{Lt}{Lt - Dc - 2Lp}\right) \left(\frac{Lc - Hs}{Lc}\right) \geq 0.6V_y = 0.6 * 0.55Dc * tzp * Fyc$$

Calculando el primer término de la desigualdad:

$$V_{pz} = \frac{7.79 \times 10^8 N \cdot mm}{(586mm + 25mm)} \left(\frac{7210mm}{7210mm - 330mm - 2 * 440mm}\right) \left(\frac{3000mm - 586mm}{300mm}\right)$$

$$V_{pz} = 1.234 \times 10^6 N$$

Calculando el segundo término de la desigualdad:

$$V_y = 0.55 * 330mm * 34mm * 345MPa$$

$$V_y = 2.098 \times 10^6$$



$$V_{pz} = 1.234 \times 10^6 N < 0.9V_y = 1.88 \times 10^6 N \therefore \text{cumple!!!}$$

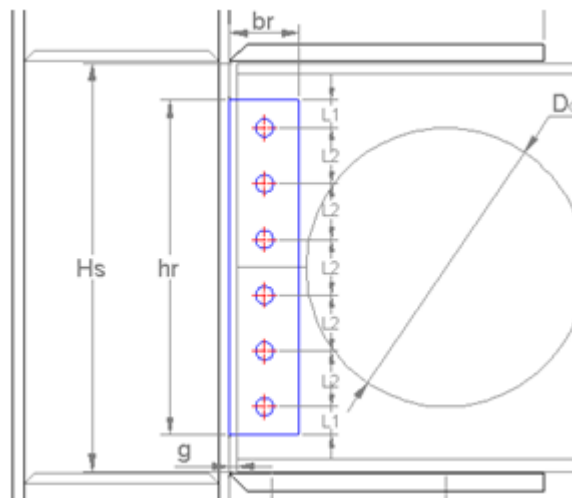
$$V_{pz} = 1.234 \times 10^6 N > 0.6V_y = 1.25 \times 10^6 N \therefore \text{no cumple}$$

De esta manera se puede garantizar un buen comportamiento del mecanismo de fluencia, dado de que a pesar de que la segunda relación no se cumple el valor está muy cercano

### 3.3.10 Recibidor a cortante del alma

El chequeo del recibidor de cortante del alma se realiza con la cortante de plastificación  $V_{pr}$  calculada anteriormente. La Figura 27 muestra el recibidor.

Figura 27. Recibidor a cortante del alma



La altura máxima  $h_r$  del recibidor es igual a  $H_s - 2$

$$h_r \leq H_s - 2(t_{fb} + r_b)$$



$$h_r \leq 586mm - 2(13.5mm + 21mm)$$

$$h_r \leq 516mm$$

Para iniciar el diseño se asume una longitud  $h_r$  igual a:

$$h_r = 400mm$$

El acero empleado para este recibidor es ASTM-A36.

$$f_{yr} = 250MPa$$

$$F_{ur} = 400MPa$$

- Cantidad y diámetro de tornillos.

Empleando tornillos ASTM-A325 y considerando rosca en los planos de corte:

$$\phi V_n = \phi A_b F_v$$

Donde:

$A_b$  = área de la sección transversal de los pernos

$F_v$  = resistencia a cortante de los tornillos,  $372MPa$

Asumiendo pernos de diámetro  $\phi_p = 5/8"$ :

$$\phi = 0.75$$

$$A_b = 198mm^2$$

$$\phi V_n = 0.75 * 198mm^2 * 372MPa$$

$$\phi V_n = 55223N$$



La cantidad de pernos requerida  $n$ , es igual a:

$$n \geq \frac{V_{pr}}{\phi V_n}$$
$$n \geq \frac{275289N}{0.75 * 55223N}$$

$$n \geq 5.2$$

Por lo tanto se emplearan 6 tornillos de 5/8" en el alma. Según NSR-10 F.2.10 las distancias mínimas al borde y separación entre perforaciones deben cumplir  $1.5\phi_{perf}$  y  $3\phi_{perf}$  respectivamente.

Donde

$\phi_{perf}$  es el diámetro de las perforaciones y se calcula como:

$$\phi_{perf} = 1.6mm + \phi_p$$

$$\phi_{perf} = 17.6mm$$

La separación al borde  $L_1 \geq 1.5\phi_{perf} = 26mm$

Se asume  $L_1 = 30mm$

La separación entre perforaciones es:

$$L_2 = (h_r - 2L_1)/(n - 1)$$

$$L_2 = \frac{400 - 60}{6 - 1}$$

$$L_2 = 68mm > 3\phi_{perf} = 53mm \therefore \text{cumple!!!}$$



- Espesor de recibidor

Para el cálculo del espesor del recibidor se deben tener en cuenta los conceptos de fluencia del área bruta, rotura del área neta y bloque de cortante. Empleando el criterio de FEMA 350 que recomienda que el espesor del recibidor sea mayor o igual que el alma de la viga, se asume un espesor inicial de:

$$t_r = 9mm$$

Y el ancho del recibidor se asume igual a:

$$b_r = 80mm > 3\phi_{perf} = 53mm$$

- Fluencia del área bruta

$$\phi V_n = \phi 0.6 F_{yr} A_{gv} \geq V_{pr}$$

Donde:

$A_{gv}$  es el área bruta a cortante.

$$\phi = 1$$

$$A_{gv} = h_r t_r$$

$$A_{gv} = 400mm * 9mm = 3600mm^2$$

Por lo tanto

$$\phi V_n = 1 * 0.6 * 250MPa * 3600mm^2$$

$$\phi V_n = 540000N > 275289N \therefore \text{cumple!!!}$$





- Fractura del área neta cortante

$$\phi V_n = \phi 0.6 F_{ur} A_{nv} \geq V_{pr}$$

Donde:

$A_{nv}$  = área neta cortante del receptor donde el diámetro de la perforación se aumenta 3.2mm al diámetro del tornillo para tener en cuenta los efectos de punzonamiento en la perforación.

$$\phi = 0.75$$

$$A_{nv} = t_r (h_r - n(\phi_p + 3.2mm))$$

$$A_{nv} = 9mm(400mm - 6(15mm + 3.2mm))$$

$$A_{nv} = 2570mm^2$$

Por lo tanto

$$\phi V_n = 0.75 * 0.6 * 400MPa * 2570mm^2$$

$$\phi V_n = 462591N > 275289N \therefore \text{cumple!!!}$$

- Bloque de cortante

El cálculo del bloque de cortante considera la interacción entre tensión y cortante en la zona de los pernos. En la Figura 28 se muestran las áreas críticas para su cálculo.

$$V_n = 0.60 F_{ur} + A_{nv} + U_{bs} F_{ur} A_{nt} < 0.6 F_{yr} A_{gv} + U_{bs} F_{ur} A_{nt}$$

Donde

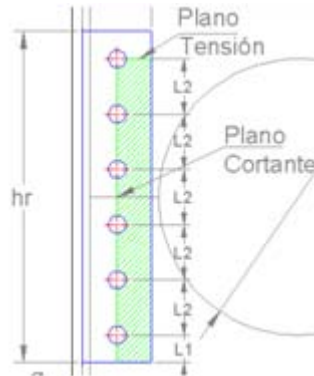
$U_{bs} = 1$ , por considerarse uniforme el esfuerzo de tensión

$A_{nt}$  = área neta a tensión

$$\phi = 0.75$$



Figura 28. Bloque de cortante



El área neta a tensión se calcula como:

$$A_{nt} = t_r \frac{(b_r - (\phi_p + 3.2mm))}{2}$$

$$A_{nt} = 9mm \frac{(80mm - (15mm + 3.2mm))}{2}$$

$$A_{nt} = 274mm^2$$

El valor de  $V_n$  será el menor entre los dos valores obtenidos:

$$V_n = 0.60 * 400MPa + 2570mm^2 + 1 * 400MPa * 274mm^2$$

$$V_n = 661653N$$

$$V_n = 0.6 * 250MPa * 3600mm^2 + 1 * 400MPa * 274mm^2$$

$$V_n = 609165N \therefore \text{controla}$$

$$\phi V_n = 0.75 * 609165N = 496240N$$

$$\phi V_n = 496240N > 275289N \therefore \text{cumple!!!}$$



- Filete de soldadura en el receptor

Asumiendo la longitud del filete igual a:

$$L_w = 2 * h_r = 800mm$$

El espesor del filete se calcula como sigue:

$$t_w = \frac{V_{pr}}{\phi 0.707 F_w L_w}$$

Donde

$$\phi = 0.75$$

$$F_w = 0.6 F_{EXX}; F_{EXX} = 483MPa$$

$$t_w = \frac{275289N}{0.75 * 0.707 * 0.6 * 483MPa * 800mm}$$

$$t_w = 2.2mm$$

Verificando los espesores mínimos con la tabla F.2.10.2-4 NSR-10 (Figura 29) se obtiene un espesor:

$$t_w = 5mm \therefore \text{controla}$$



Figura 29. Tamaño mínimo de soldaduras de filete

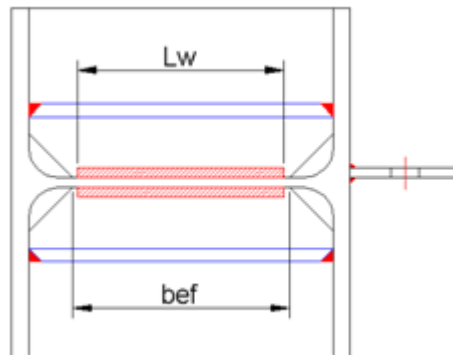
Espesor de la parte más delgada a unir, mm	Tamaño Mínimo de la Soldadura de Filete <sup>(a)</sup> mm
Hasta 6.4 inclusive	3
mayor que 6.4 a 12.7	5
mayor que 12.7	6
mayor que 19.1	8

<sup>(a)</sup> Dimensión del lado de la soldadura de filete. Debe aplicarse en una sola pasada.

### 3.3.11 Soldadura de placa continuidad – Alma columna

La placa de continuidad se puede soldar al alma de la columna en filete o acanalada de penetración total. Por razones de economía y tiempo de fabricación se recomienda emplear filete arriba y abajo. Por lo tanto, el filete de soldadura aplicado debe resistir la capacidad a fluencia por cortante de la placa.

Figura 30. Soldadura placa de continuidad



El espesor de filete  $t_w$  se calcula como:

$$t_w = \frac{V_{ve}}{\phi 0.707 F_w (2 * L_w)}$$

Donde,  $\phi = 0.75$

$V_{ve}$  , = resistencia a fluencia por cortante de la placa



$b_{ef}$  , = longitud que se calcula teniendo en cuenta las recomendaciones de ANSI/AISC 358 (4) evitando aplicar soldaduras en la zona K (Figura 31).

Figura 31. Determinación de zona K

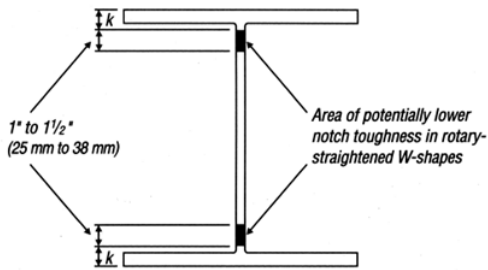


Fig. C-I-6.1. "k-area."

*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, March 9, 2005, incl. Supplement No. 1  
AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC.

$$b_{ef} = 200mm$$

$$L_w = 190mm$$

La resistencia a fluencia se calcula:

$$V_{ve} = 0.6t_p F_{yp} b_{ef}$$

$$V_{ve} = 0.6 * 15mm * 250MPa * 200mm$$

$$V_{ve} = 480000N$$

El espesor de la soldadura requerido es:

$$t_w = \frac{480000N}{0.75 * 0.707 * 0.6 * 483MPa(2 * 190mm)}$$

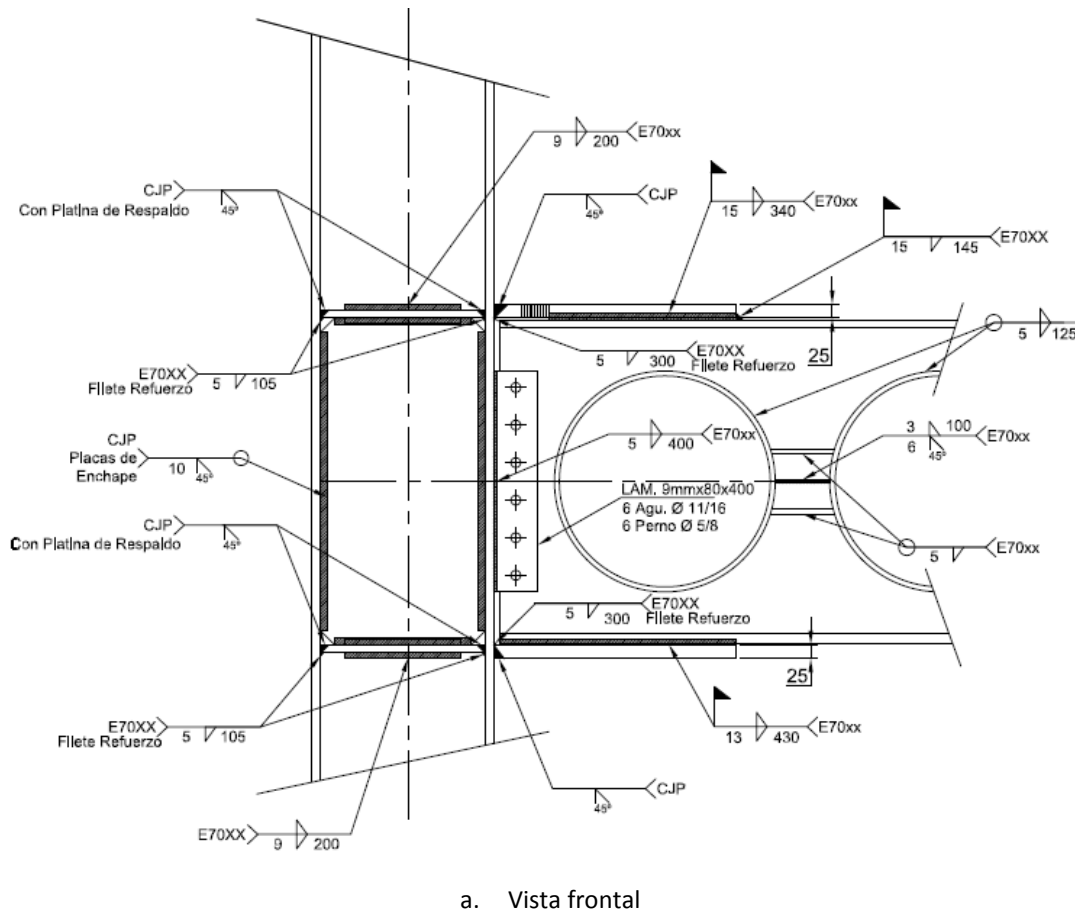
$$t_w = 8.22mm$$

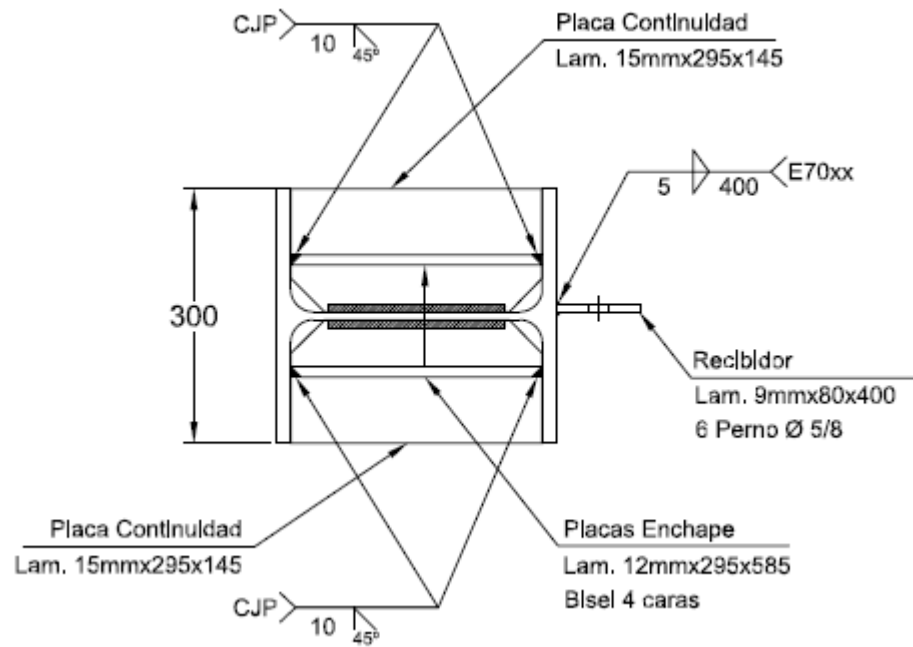
Dado que  $t_w$  es mayor que el mínimo recomendado en la Figura 29, se usará:

$$t_w = 9mm$$

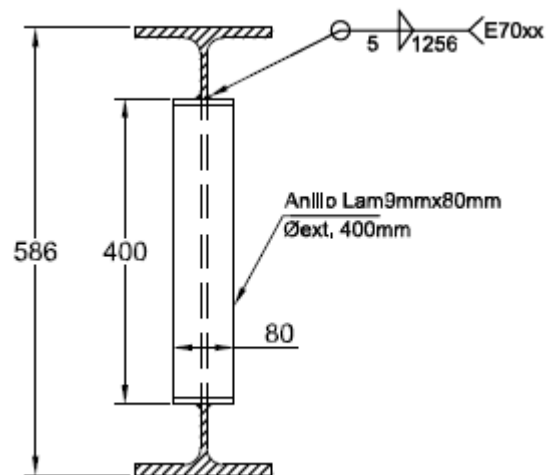
En la Figura 32 se muestra el esquema de la conexión diseñada.

Figura 32. Diseño de la conexión





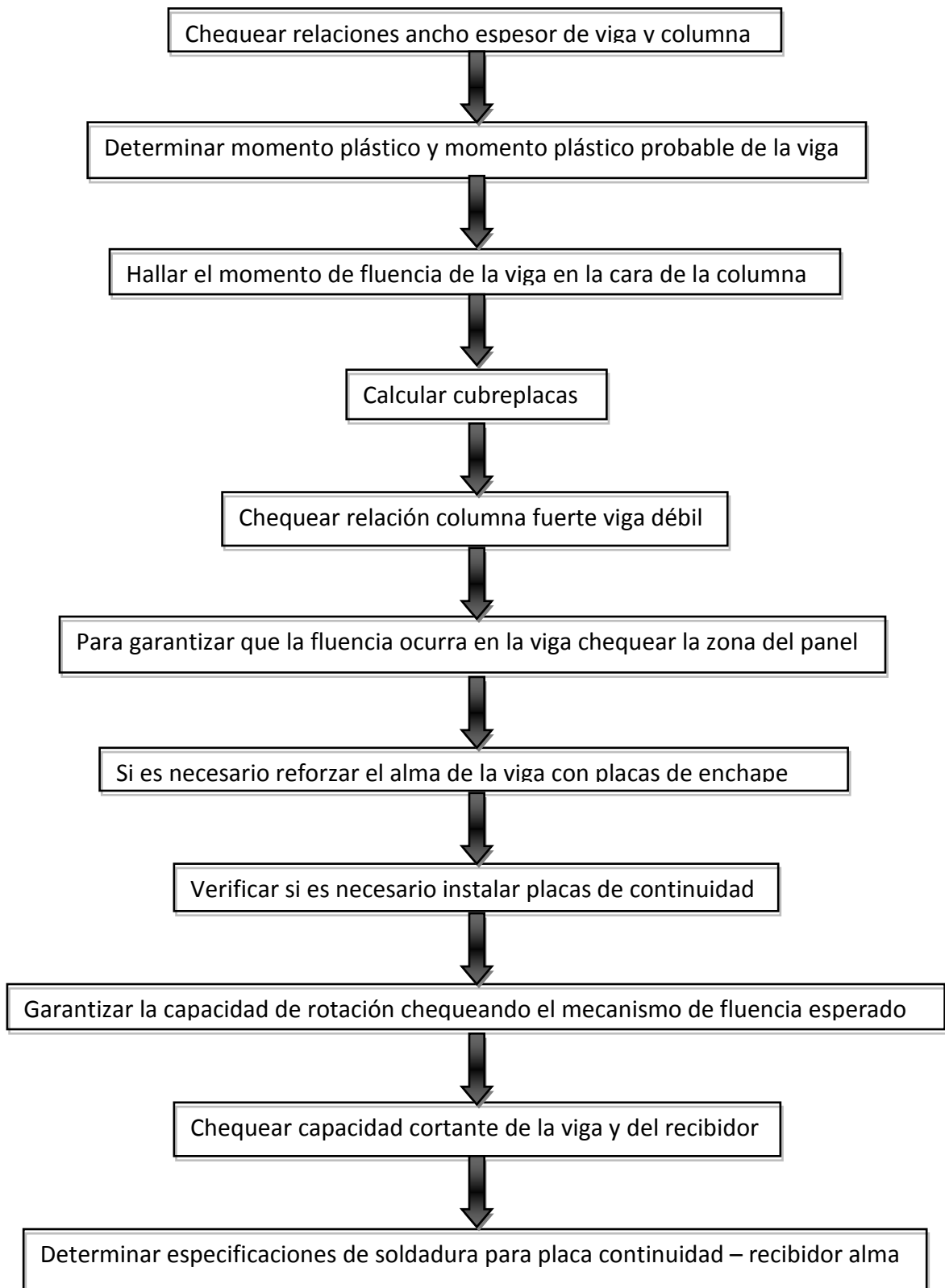
b. Corte sobre la columna



c. Detalle de atiesadores



### 3.3.12 Diagrama de flujo del diseño







### 3.3.13 Resumen del diseño

#### PASO 1. RELACIONES ANCHO ESPESOR

Patín de viga y columna

$$\frac{b}{t} = \frac{b_f}{2 * t_f} < 0.3 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Alma columna

$$\frac{h}{t_w} = \frac{d}{t_w} < 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 0.93Ca)$$

Alma en Tee de la viga

$$\frac{d}{t_{wb}} = \frac{h_{ts}}{t_{wb}} < 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}}$$

Alma de la viga

$$\frac{h}{t_w} = \frac{H_s - 2(r + t_{fb})}{t_{wb}} < 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} (1 - 0.93Ca)$$

#### PASO 2. CÁLCULO DE LOS MOMENTOS $M_p$ Y $M_{pr}$

$$M_{pb1} = A_{ts} P_y h_U$$

$$M_{pb2} = Z_{xb} f_{yb}$$

$$\bar{M}_{pb} = \frac{M_{pb1} + M_{pb2}}{2}$$

$$M_{pr} = C_{pr} R_y \bar{M}_{pb}$$



**PASO 3. MOMENTO DE FLUENCIA  $M_{yf}$  SOBRE LA VIGA EN LA CARA DE LA COLUMNA**

$$M_{yf} = C_y M_f$$

**PASO 4. CALCULO DE LAS CUBREPLACAS**

$$L_p < \frac{L_t}{2} - \frac{M_{pr}(L_t + D_c)(L_c - H_s)}{4Z_{xc}L_c(F_{yc} - \frac{p_u}{A_{gc}})}$$

$$t_p = \frac{M_{yf}}{F_{yp}b_p \left[ H_s + \frac{t_{plb} + t_{plt}}{2} \right]}$$

**PASO 5. VERIFICACIÓN COLUMNA FUERTE VIGA DÉBIL**

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0$$

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1R_y F_{yb} Z_b + M_{uv})$$

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc}/A_g)$$

**PASO 6. CHEQUEO DE LA ZONA DEL PANEL**

$$t = \frac{C_y M_c \frac{l_c - H_s}{l_c}}{(0.9)0.6 F_{yc} R_{yc} D_c [H_s - t_{fb}]}$$

**PASO 7. CHEQUEO PLATINAS DE CONTINUIDAD**

$$t_{fc} \geq 0.4 \sqrt{1.8 b_{fb} t_{fb} \frac{f_{yb} R_{yb}}{f_{yc} R_{yc}}}$$

$$t_{fc} \geq \frac{b_{fb}}{6}$$



*PASO 8. MECANISMO DE FLUENCIA ESPERADO*

$$V_{pz} = \frac{\sum Mfy}{\left(H_s + \frac{tpi + tps}{2}\right)} \left(\frac{Lt}{Lt - Dc - 2Lp}\right) \left(\frac{Lc - Hs}{Lc}\right) \leq 0.9V_y = 0.9 * 0.55Dc * tzp * F_{yc}$$

$$V_{pz} = \frac{\sum Mfy}{\left(H_s + \frac{tpi + tps}{2}\right)} \left(\frac{Lt}{Lt - Dc - 2Lp}\right) \left(\frac{Lc - Hs}{Lc}\right) \geq 0.6V_y = 0.6 * 0.55Dc * tzp * F_{yc}$$

*PASO 9. RECIBIDOR A CORTANTE DEL ALMA*

$$h_r \leq H_s - 2(t_{fb} + r_b)$$

$$\phi V_n = \phi A_b F_v$$

$$\phi V_n = \phi 0.6 F_{yr} A_{gv} \geq V_{pr}$$

$$\phi V_n = \phi 0.6 F_{ur} A_{nv} \geq V_{pr}$$

$$V_n = 0.60 F_{ur} + A_{nv} + U_{bs} F_{ur} A_{nt} < 0.6 F_{yr} A_{gv} + U_{bs} F_{ur} A_{nt}$$

*PASO 10. SOLDADURA DE PLACA CONTINUIDAD – ALMA COLUMNA*

$$t_w = \frac{V_{ve}}{\phi 0.707 F_w (2 * L_w)}$$



En la Tabla 1 Continuación se muestra el resumen de los valores obtenidos en el diseño.

Tabla 1. Resumen del Diseño

$M_f$	Momento plástico probable de la viga en la cara de la columna	$9.924 \times 10^8$	<i>N. mm</i>
$M_{yf}$	Momento de fluencia de la viga en la cara de la columna	$7.79 \times 10^8$	<i>N. mm</i>
$M_{pr}$	Momento de plastificación probable	$8.713 \times 10^8$	<i>N. mm</i>
$\bar{M}_{pb}$	Momento plástico promedio de la viga	$6.875 \times 10^8$	<i>N. mm</i>
$L_p$	Longitud de las cubreplacas	440	mm
$t_{pi}$	Espesor de la cubreplacas	25	mm
$L_{wi}$	Longitud del filete de soldadura inferior	860	mm
$t_{wi}$	Tamaño del filete de la soldadura inferior	13	mm
$L_{ws}$	Longitud del filete de soldadura superior	825	mm
$t_{ws}$	Tamaño del filete de la soldadura superior	15	mm
$M_{uv}$	es el momento adicional en el eje de la columna	$1.67 \times 10^8$	<i>N. mm</i>
$V_{pr}$	cortante de plastificación probable	275.289	N
$h_r$	Altura del recibidor	400	mm
$t_w$	Espesor filete recibidor	5	mm



## **4 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO**

En la planta de una empresa de fabricación certificada por la ISO-9001 para la construcción de estructuras metálicas, se fabricó el espécimen de prueba siguiendo las especificaciones de los planos de diseño.

### **4.1 FABRICACIÓN DE LA VIGA DE ALMA EXPANDIDA**

El proceso de fabricación empleado fue manual, tanto el sistema de corte por plasma como el proceso de soldadura. Este sistema de fabricación es similar al que se empleaba en la década de 1930 cuando se construyeron las primeras vigas *casteladas*. A continuación se muestra el registro fotográfico del proceso constructivo.

1. Trazo del corte en la viga



2. Corte de la viga





3. Vista corte viga



4. Corte total de la viga



5. Viga



6. Detalle de junta



7. Soldadura de la viga



8. Detalle de soldadura





9. Viga Celular



#### **4.2 FABRICACIÓN DE LA CONEXIÓN**

Los elementos de la conexión tales como placas de continuidad, cubreplacas, placa de cortante y placas de enchape fueron soldados en taller empleando el proceso de soldadura GMAW. La soldadura de las cubreplacas a la viga para conformar el vínculo viga-columna está especificada para realizar en campo y por lo tanto se realizó empleando el proceso de soldadura SMAW con electrodo revestido simulando las condiciones reales del montaje.

El procedimiento y aplicación de la soldadura fue inspeccionado de forma visual y con el ensayo de tintas penetrantes. La soldadura fue ejecutada por soldadores calificados siguiendo todas las especificaciones de preparación de juntas y espesores de filetes descritos en los planos de fabricación. En el Anexo C se muestran los certificados de calidad de materiales, ensayo de tintas penetrantes, calibración de equipos y calificación de los operarios.



### 4.3 COSTOS

Con el fin de tener un estimado del costo de fabricación de la viga celular empleando el sistema constructivo descrito, se realizó un control detallado de la mano de obra, insumos y equipos empleados. Los valores resaltados en la Tabla 2 son los que determinan el costo de fabricación obtenido, los demás valores se pueden tomar como base para un posible costo de venta. El costo de la fabricación obtenido sin incluir el desperdicio fue de \$519/kg.

Tabla 2. Análisis de precios unitarios

1.0	MATERIALES		CANT	VR UNIT (\$)	VR TOTAL (\$)	
	DESCRIPCIÓN	UND				
1.1	ACERO ESTRUCTURAL- A 572 GR 50	Kg	0.83	2,262	1,872	
1.2	ACERO ESTRUCTURAL- A 36	Kg	0.17	2,320	401	
1.3	TORNILLERÍA ASTM A-325	GL	1.0	26	26	
1.4	ANTICORROSIVO ALQUIDICO BLANCO 2 MILS	Kg	1.0	29	29	
1.5	DESPERDICIO	%	6.5%	2,262	122	
						\$ 2,449

2.0	FLETES Y ACARREOS		RDTO	VR UNIT.	VR TOTAL	
	DESCRIPCIÓN	UND				
2.1	TRANSPORTE INTERNO	UND	0.003	15,000	49	
2.2	TRANSPORTE EXTERNO	GLB	1.0	150	150	
						\$ 199

3.0	INSUMOS DE FABRICACION		RDTO	VR UNIT.	VR TOTAL	
	DESCRIPCION	UND				
3.1	SOLDADURA	Kg	0.021	5,394	115	
3.2	ABRASIVOS DE CORTE	GLB	1.0	31	31	
3.3	DESENGRASANTES Y DISOLV.	GLB	1.0	24	24	
3.4	GASES	GLB	1.0	86	86	
						\$ 257





4.0	MANO DE OBRA		CANT	VR UNIT.	VR TOTAL	
	DESCRIPCION	UND				
4.1	FABRICACIÓN	Kg	1.0	188	188	
4.2	PINTURA EN PLANTA	Kg	1.0	120	120	
4.3	PINTURA EN OBRA	Kg	1.0	100	100	
4.4	MONTAJE	Kg	1.0	500	500	
						\$ 908

5	ENSAYOS		CANT	VR UNIT.	VR TOTAL	
	DESCRIPCION	UND				
5.1	ENSAYOS VARIOS	Kg	1.0	50	50	
						\$ 50

7	EQUIPOS Y HERRAM.		CANT	VR UNIT.	VR TOTAL	
	DESCRIPCION	UND				
7.1	MAQUINA SOLDADORA	GL	1.0	40	40	
7.2	EQUIPO DE OXICORTE	GL	1.0	25	25	
7.3	PULIDORA MANUAL	GL	1.0	10	10	
7.4	COMPRESOR	GL	1.0	5	5	
7.5	TALADRO MANUAL	GL	1.0	7	7	
7.6	OTROS	GL	1.0	5	5	
7.7	EQUIPOS DE ALTURA	GL	1.0	150	150	
						\$ 242

Tabla 3. Costos mano de obra

DESCRIPCIÓN	CARGO	SALARIO	H-H DIURNA	HORAS LABORADAS	\$\$H-H DIURNA LABORADA
Corte	Oficial	\$ 1,500,000	\$ 6,250	3	\$ 18,750
Biselado	Ayudante practico	\$ 909,000	\$ 3,788	2	\$ 7,575
Armado	Oficial	\$ 1,425,000	\$ 5,938	2	\$ 11,875
Soldadura	Oficial	\$ 1,575,000	\$ 6,563	3	\$ 19,688
LIMPIEZA Y PINTURA EN PLANTA	Pintor				\$ 0
	Ayudante				\$ 0
LIMPIEZA Y PINTURA EN OBRA					\$ 0
					\$ 0
MONTAJE					\$ 0
					\$ 0



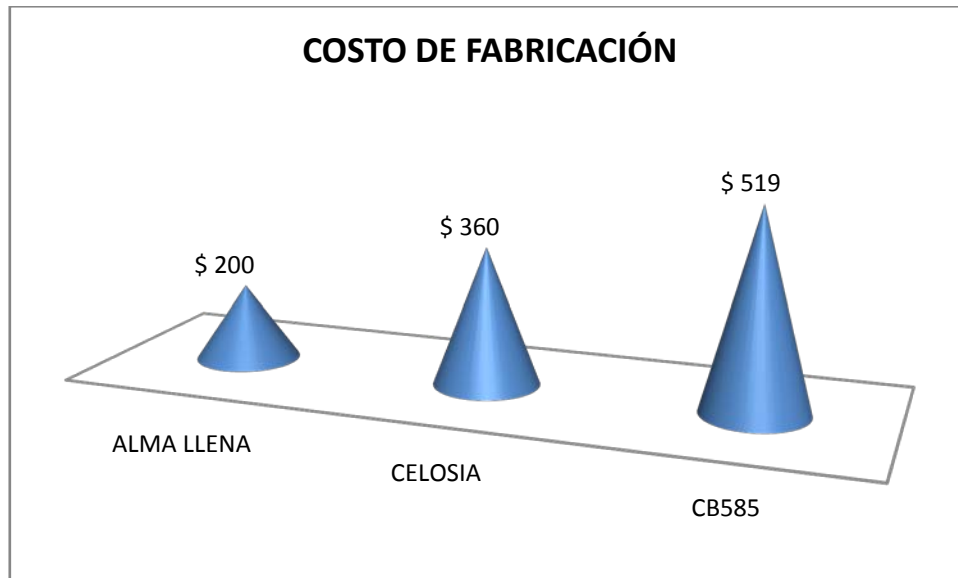
Tabla 4. Insumos de fabricación

DESCRIPCIÓN	UND.	CANT.	VALOR COMPRA	VR TOTAL
SOLDADURA	Kg	6.59	\$ 5,394	\$ 35,556
			\$ -	\$ -
		<b>TOTAL</b>		\$ 35,556
ABRASIVOS DE CORTE	UNIDAD	1.000	\$ 5,054	\$ 5,054
		1.000	\$ 4,449	\$ 4,449
		<b>TOTAL</b>		\$ 9,503
DESENGRASANTES Y DISOLVENTE	UNIDAD	1.000	\$ 7,540	\$ 7,540
		<b>TOTAL</b>		\$ 7,540
GASES	UNIDAD	7,540	\$ 2	\$ 15,080
		46,400	\$ 0.25	\$ 11,600
				\$ -
		<b>TOTAL</b>		\$ 26,680

De la base de datos del fabricante del prototipo, se obtuvo que el costo de fabricación empleando perfiles de alma llena esta alrededor de \$200/kg y de viga en celosía de ángulo alrededor de \$360/kg. La **Figura 33** presenta el comparativo de costos de fabricación.



Figura 33. Comparativo costo de fabricación

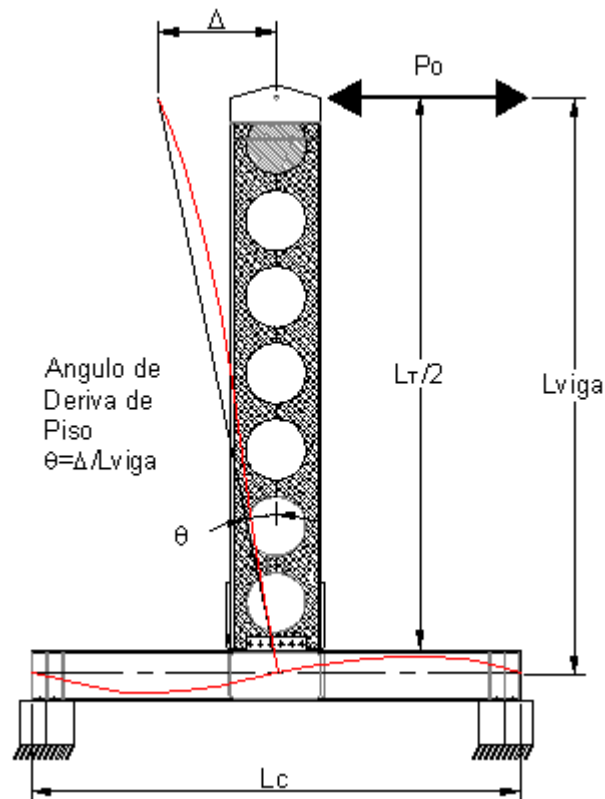


Es evidente que el desperdicio, por el corte de los sobrantes en los extremos, eleva el costo de la fabricación en este prototipo, sin embargo, para la construcción de vigas de longitudes reales el desperdicio puede llegar ser nulo. Esta fue la razón para no incluir el costo del desperdicio en el análisis.

## 5 ENSAYO EN EL MARCO DE PRUEBAS

Para realizar la prueba y verificar la capacidad de rotación de la conexión el prototipo fue ensayado en el laboratorio Map-H “Marco de Pruebas y Homologaciones” de la Universidad del valle, Colombia. La Figura 34 muestra la metodología del ensayo.

Figura 34. Metodología del ensayo



El marco de pruebas está conformado por una unidad de carga o actuador hidráulico con capacidad para aplicar 500KN y un máximo desplazamiento de 600mm en un ciclo,  $\Delta_{max} = 300mm$  a una velocidad máxima es de 1.6cm/seg, ver Figura 35 . La celda de carga empleada para registrar la información fue de 1200KN.



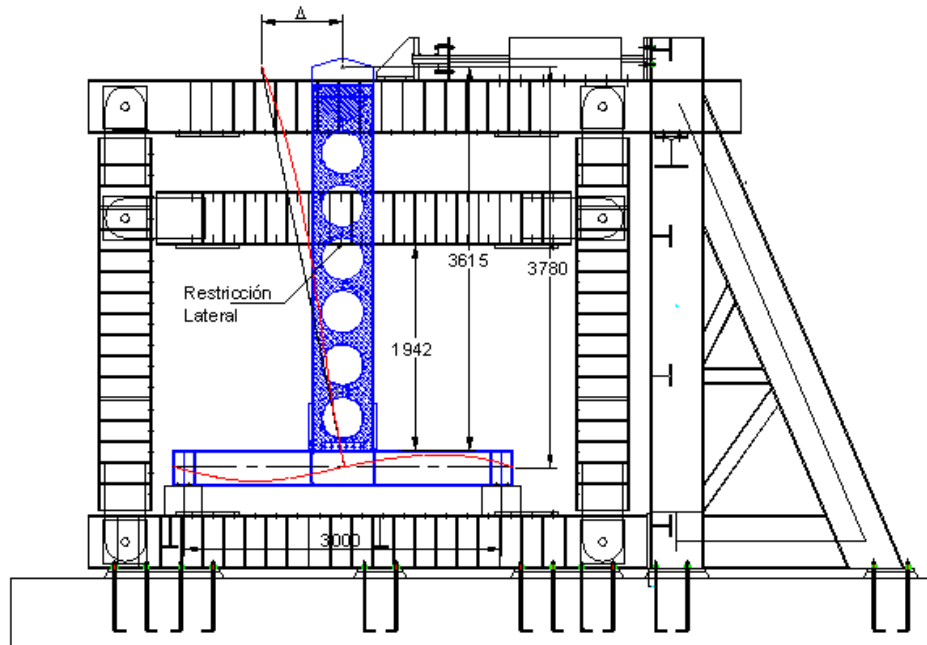
Figura 35. Actuador marco de prueba



### **5.1 MONTAJE E INSTRUMENTACIÓN**

El espécimen para el ensayo se construyó en forma de Tee, es decir con una sola viga llegando por el patín de la columna. El montaje realizado se muestra en la Figura 36 donde se puede apreciar que por la disposición del actuador, la columna se posiciona horizontalmente mientras que la viga vertical. Esta configuración resulta conveniente para la instrumentación y segura para la operación dado que las altas reacciones que se producen en los apoyos de la columna son directamente trasladadas a la cimentación. El actuador fue conectado a la viga por medio de un perno  $\phi 1''$  grado 5. Se suministró soportes laterales en los patines de la viga a una distancia de 1942mm de la cara de la columna como se muestran en la Figura 36.

Figura 36. Montaje en el marco de pruebas



Las características de la conexión ensayada se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de la conexión

Hs	585.6	Altura Total Viga Expandida,(mm)
Lbprot	3615	Luz libre del prototipo,(mm)
Lc	3000	Luz libre de la columna,(mm)
Lt/Hs	12.31	Relación altura - luz libre viga
S/Do	1.25	Relación Separación-Diámetro perforaciones
Hs/Do	1.464	Relación Altura viga-Diámetro perforaciones
Hs/h	1.464	Relación Alturas viga expandida-viga base
e/Hs	0.17	Relación ancho alma-altura

### 5.1.1 Instrumentación utilizada

Con el fin de obtener la mayor información posible del ensayo, se usaron extensómetros (LVDT's) y galgas extensométricas lineales (TML strain gauge). En la Figura 37 se muestra una imagen de la instrumentación.

Figura 37. Instrumentación realizada



a) Localización de Strain Gauge ensayo



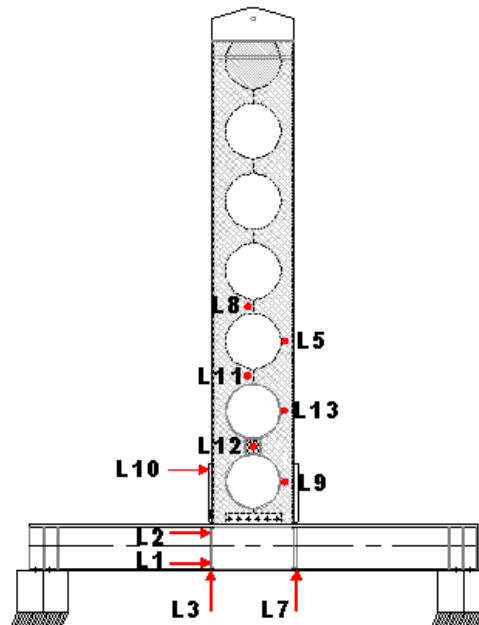
b) Localización LVDT ensayo



- Extensómetros (LVDT's)

En total se instalaron 11 extensómetros, de los cuales 6 fueron instalados en el alma de la viga para medir el efecto de los atiesadores sobre el pandeo del alma y el pandeo fuera del plano del alma en la sección Tee y entre perforaciones, 4 instalados en la columna para registrar la rigidez de la zona del panel y 1 en la cubreplaca para registrar la rigidez de la conexión. La Figura 38 muestra la localización de los extensómetros y su identificación para los análisis posteriores.

Figura 38. Identificación LVDT



- Galgas extensométricas lineales ( TML Strain Gauge)

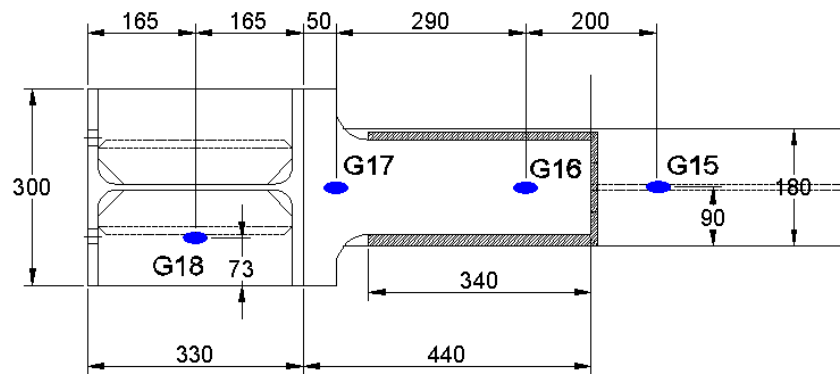
Para determinar los esfuerzos en diversos puntos de la conexión se instalaron 18 galgas extensométricas distribuidas como se muestra en la Figura 39, siguiendo las



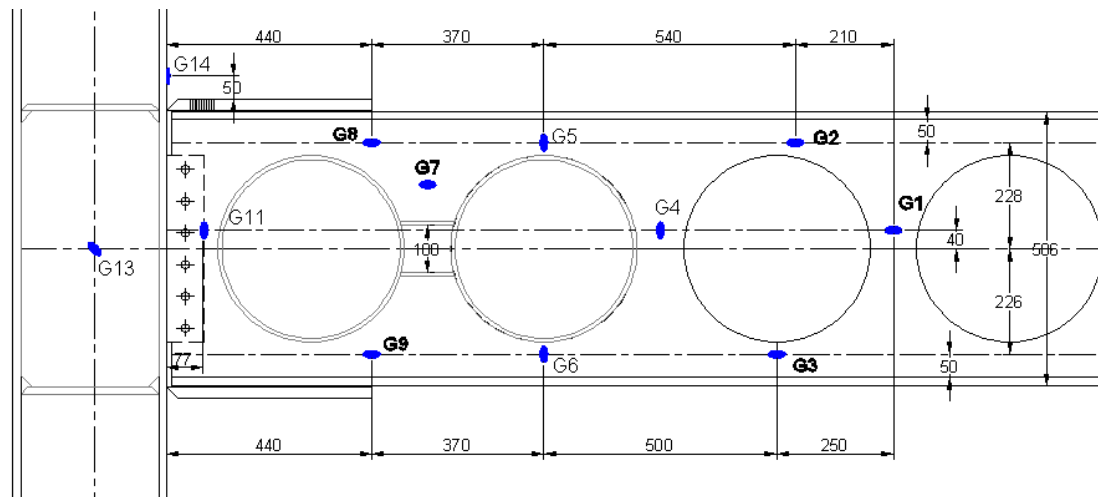


recomendaciones del fabricante y de la ASTM E1237. Estas galgas fueron conectadas en  $\frac{1}{4}$  de puente.

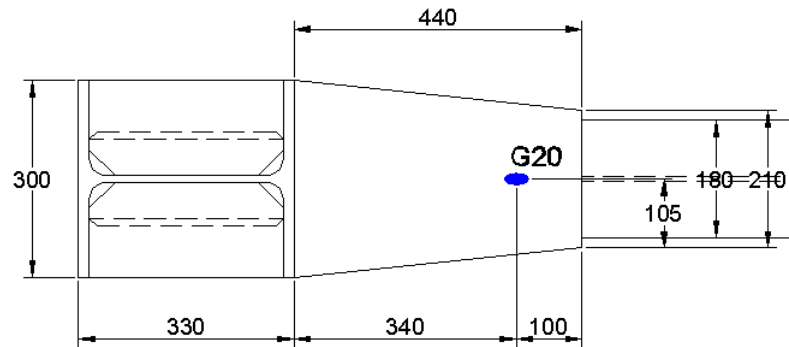
Figura 39. Localización strain gauge



a) Cubreplaca Superior



b) Alma de la viga



c) Cubreplaca inferior

#### - Adquisición de Datos

Las señales o voltaje proveniente de la instrumentación instalada, por medio de una tarjeta de adquisición de datos con módulos para acondicionamiento analógico se filtran y se recopilan en un ordenador de datos. La rata de adquisición fue de 16HZ adquiriendo en total 22762 datos por cada instrumento. En total se reportaron datos en 31 canales.

Una vez filtrada la información los datos fueron procesados empleando MATLAB<sup>2</sup>. Dentro del procesamiento de la información a todos los registros de galgas y lvdt se les aplicó un factor para convertirlos de voltaje a deformación y desplazamiento respectivamente, en la Figura 40 se muestran los factores empleados para cada instrumento.

<sup>2</sup> MATLAB R2010b, versión 7.11. Software para el procesamiento de información



Figura 40. Factor de los instrumentos

ARREGLO	SENSOR EN ARCHIVO	FACTOR INSTRUMENTO	UNIDAD
1	Lvdt Maestro	300/(9.5)	mm
2	Celda de carga	113380	N
3	Lvdt 8	5.0	mm
4	Galga1	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
5	Galga 2	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
6	Galga 3	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
7	Galga 4	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
8	Galga 5	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
9	Galga 6	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
10	Galga 7	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
11	Galga 8	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
12	Lvdt 5	5.0	mm
13	Lvdt 11	5.0	mm
14	Lvdt 13	5.0	mm
15	Lvdt 12	5.0	mm
16	Lvdt 10	5.0	mm
17	Lvdt 9	5.0	mm
18	Galga 9	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
19	Galga 11	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
20	Galga 12	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
21	Galga 13	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
22	Galga 14	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
23	Galga 15	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
24	Galga 16	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
25	Galga 17	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
26	Galga 18	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
27	Galga 20	$(1/2.1)*(4/250)$	deformación
28	Lvdt 2	1.0	mm
29	Lvdt 1	1.0	mm
30	Lvdt 3	1.50	mm
31	Lvdt 7	1.50	mm

El factor mostrado para la conversión de la información de las galgas se deduce de la siguiente expresión suministrada por el fabricante<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> TML, Tokio Sokki Kenkyujo Co., Ltd. <http://www.tml.jp>



$$\sigma = \frac{4\Delta V}{250G} E_s$$

Donde,

$\sigma$ , esfuerzo en MPa

$\Delta V$ , variación de voltaje V

$E_s$ , Módulo de Elasticidad

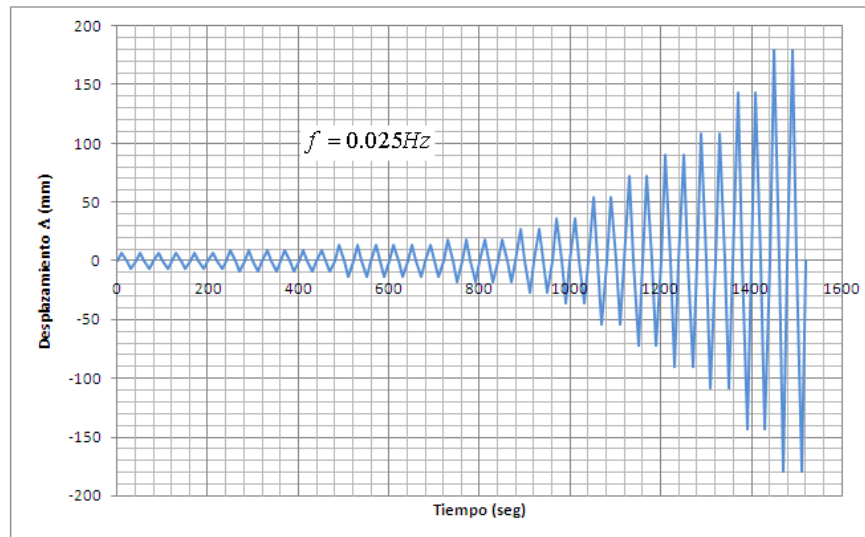
G, factor de la Galga 2.10

### **5.1.2 Historia de carga**

La historia de carga aplicada está basada en las recomendaciones del NSR-10 F.3.11.2.5. y adecuada para la viga de alma expandida introduciendo unos pasos intermedios en los ciclos del rango elástico para observar gradualmente los fenómenos de pandeo fuera del plano o plastificación tipo vierendeel. La función de carga aplicada es mostrada en la Figura 41. La frecuencia del ensayo fue de 0.025Hz, es decir 40 segundos por ciclo, con el fin de no sobrepasar la velocidad máxima del marco de pruebas.



Figura 41. Historia de carga



## **5.2 RESULTADOS DEL ENSAYO**

El ensayo se detuvo en el ciclo 34 con una rotación de 0.03 radianes debido a que se presentaron importantes pandeos fuera del plano en el alma entre las perforaciones y el decremento de la resistencia superó el 20%. A continuación se muestra un registro fotográfico del estado de la viga y de la conexión después del ensayo. Ver Figura 42 a la Figura 45.

Figura 42. Fotos 1 y 2 ensayo



1. Cubreplaca inferior



2. Pandeo en el alma

Figura 43. Foto 3 cubreplaca superior



Figura 44. Foto 4 Pandeo y restricción lateral



Figura 45. Foto 5 vista superior





### 5.2.1 Resultados de la instrumentación

A continuación se muestran los gráficos versus tiempo de algunos de los instrumentos instalados en el espécimen. La matriz 31X22762 empleada para el procesamiento de la información se denomina bf4 dentro del archivo Desarrollo.mat (Documento de MATLAB) el cual se puede consultar en el Anexo D.

Figura 46. Desplazamientos en el Actuador

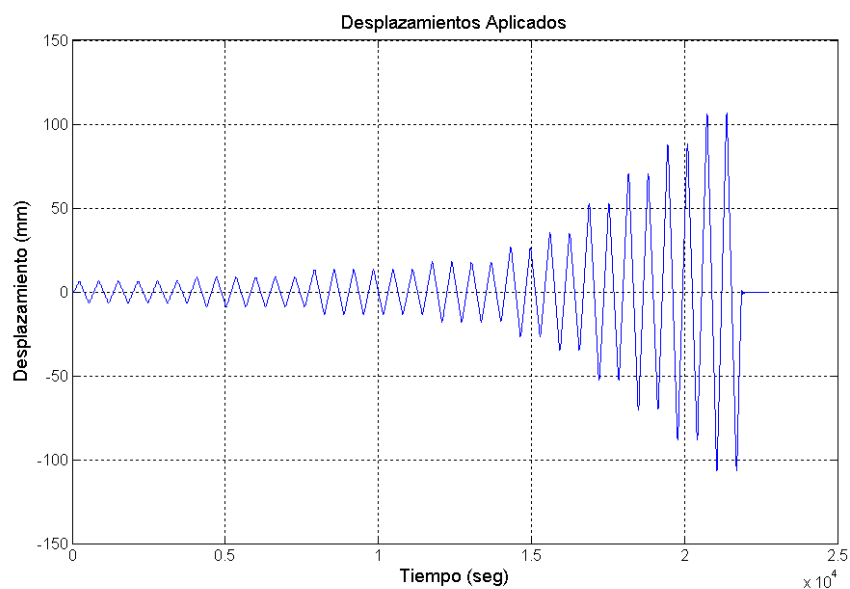






Figura 47. Carga en el actuador

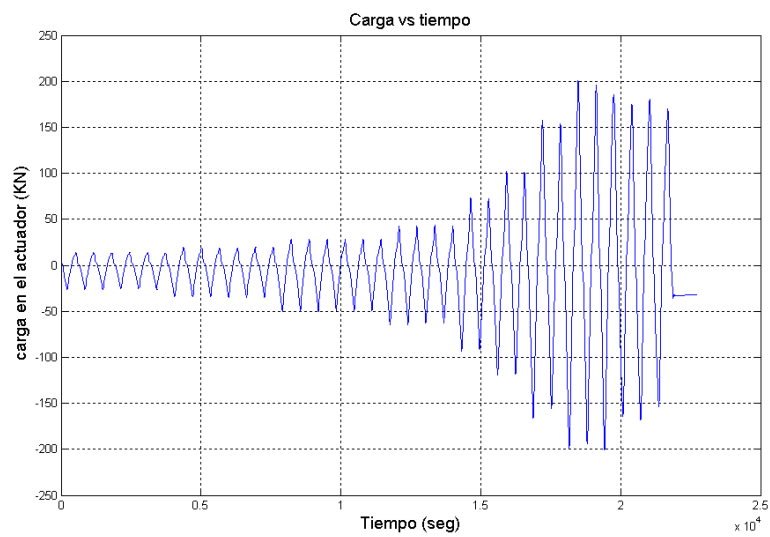


Figura 48. Desplazamiento Cubreplaca Superior

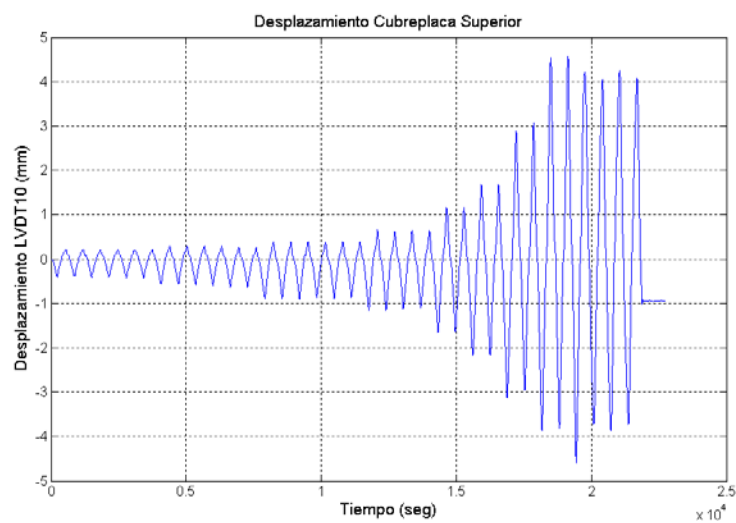
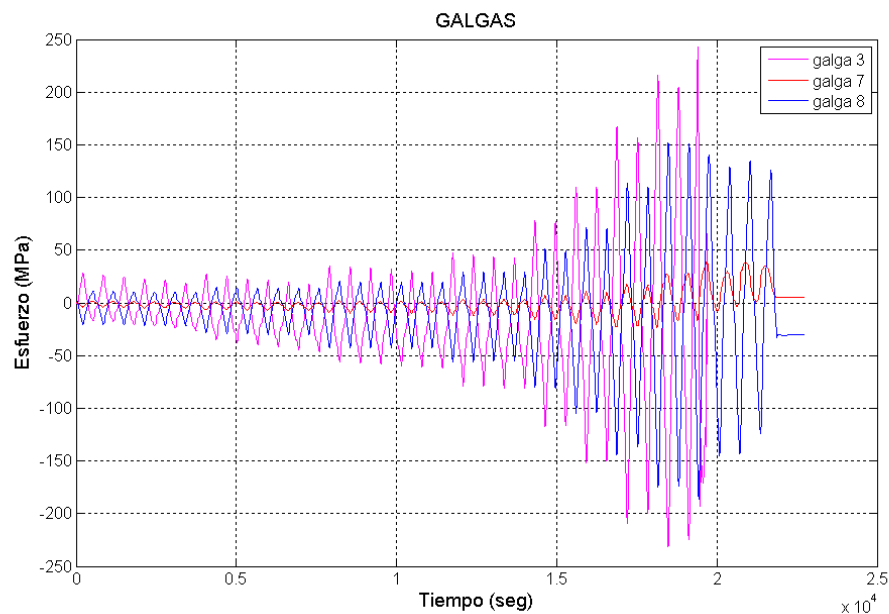




Figura 49. Esfuerzos en las galgas



La galga 8 ubicada donde se supuso la rotula plástica alcanzó un esfuerzo máximo de 150MPa en el ciclo 29 encontrándose en un 44% del límite de fluencia del material  $F_y=345\text{MPa}$ . Las demás galgas instaladas registraron en promedio hasta el ciclo 20 reportando valores de un comportamiento elástico que serán útiles para la calibración de futuros modelos en elementos finitos.

La carga máxima alcanzada en el ensayo fue de  $P_{\text{max}}=199\text{KN}$ , la cual se registra en las figuras Figura 50 y Figura 51.



Figura 50. Envolvente de Cargas

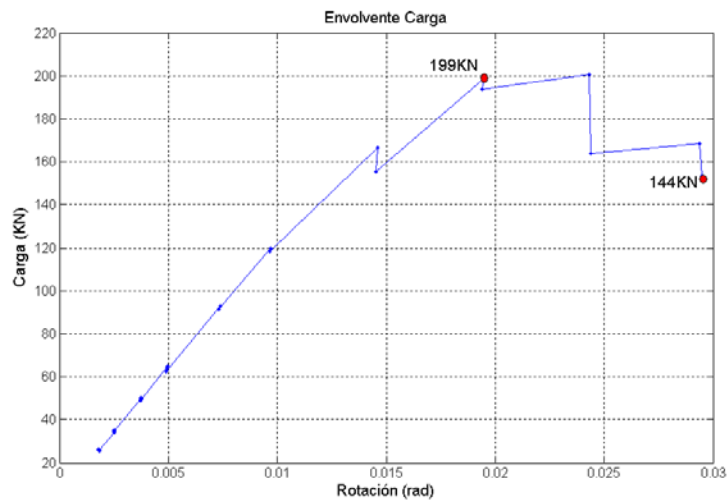
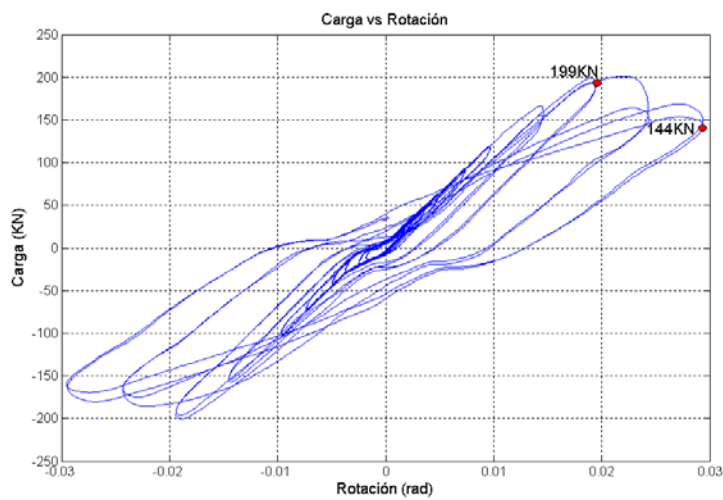


Figura 51. Carga vs Rotación

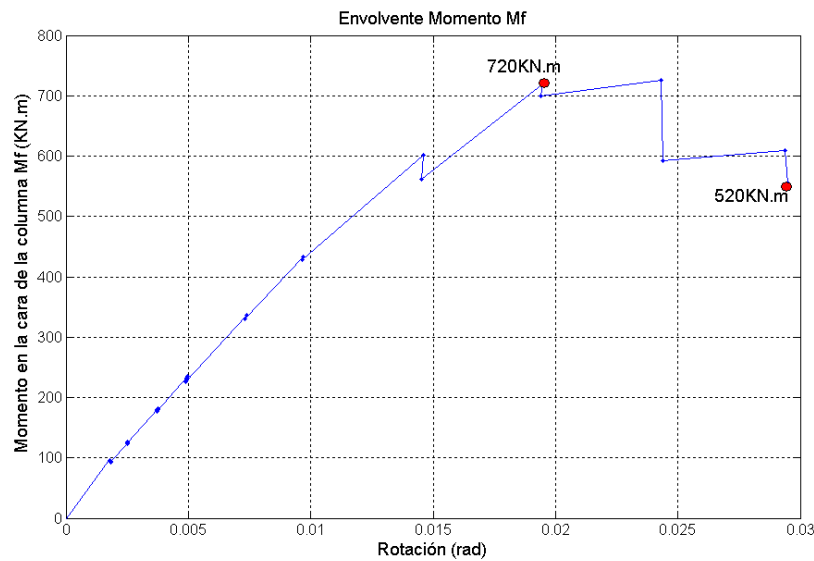


La Figura 52 muestra el momento máximo obtenido en la cara de la columna  $M_{fprueba} = 720 \text{ KN.m}$ , el cual es menor un 27% con respecto al teórico calculado.

$$M_{fteórico} = 992,4 \text{ KN.m}$$



Figura 52. Momento en la cara de la columna



### 5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los criterios para la validación del ensayo son básicamente resistencia, rigidez y ductilidad de la conexión.

Dado que los resultados obtenidos en la prueba representan el momento en la cara de la columna  $M_f$  calculado como el producto entre la carga aplicada en el extremo  $P_o$  y la distancia a la cara de la columna  $Lt/2$ , en la Figura 34 se muestra el esquema para el cálculo de  $M_f$ . Para obtener el valor de  $M_{pr}$  en el ensayo se emplearon las siguientes relaciones:

$$M_f = M_{pr} + \left( \frac{2M_{pr}}{L'} * L_p \right)$$

$$M_f = M_{pr} + \left( \frac{2M_{pr}}{6330mm} * 440mm \right)$$



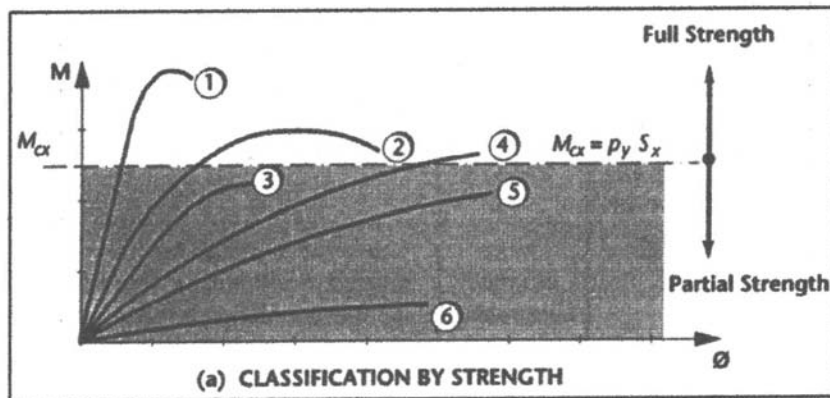
$$M_f = M_{pr} + \left( \frac{2M_{pr}}{6330mm} * 440mm \right)$$

$$M_f = 1.14M_{pr}$$

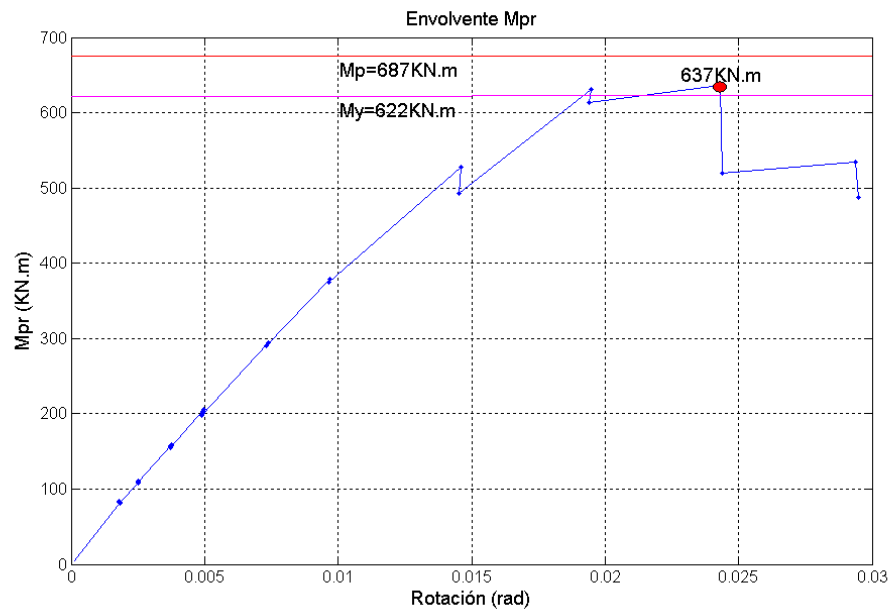
### 5.3.1 Clasificación por resistencia

Empleando la gráfica Momento  $M_{pr}$ –Rotación obtenida, el límite que define la conexión entre resistencia máxima y resistencia parcial a momento está dado por el momento plástico  $M_p$ , según BS5950 (26).

Figura 53. Clasificación por resistencia



Se debe tener en cuenta que para la clasificación de resistencia en vigas de alma expandida, el límite entre parcialmente y totalmente resistente no debe ser el momento de plastificación probable ya que este no es el que controla el diseño de la viga, por lo tanto se recomienda compararlo con el momento de fluencia de la viga.

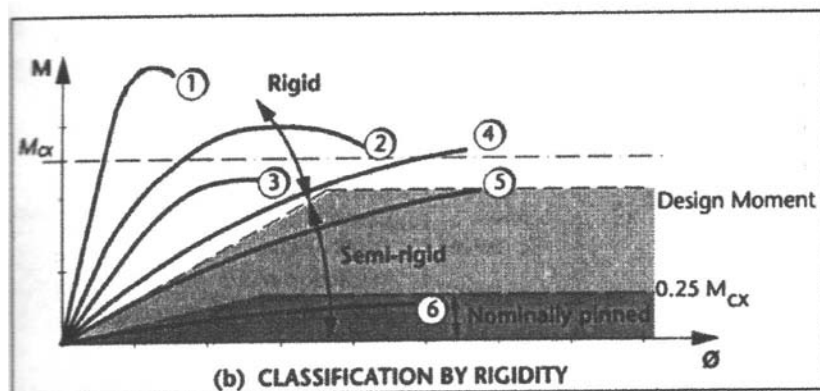


Por lo tanto, la conexión se define como de **Resistencia parcial**.

### 5.3.2 Clasificación por rigidez

Empleando la gráfica Momento probable de plastificación  $M_{pr}$ -Rotación se puede clasificar la conexión como simple, parcialmente restringida (PR) y totalmente restringida (TR). Donde los límites para la clasificación se muestran en la Figura 54.

Figura 54. Clasificación por Rigidez



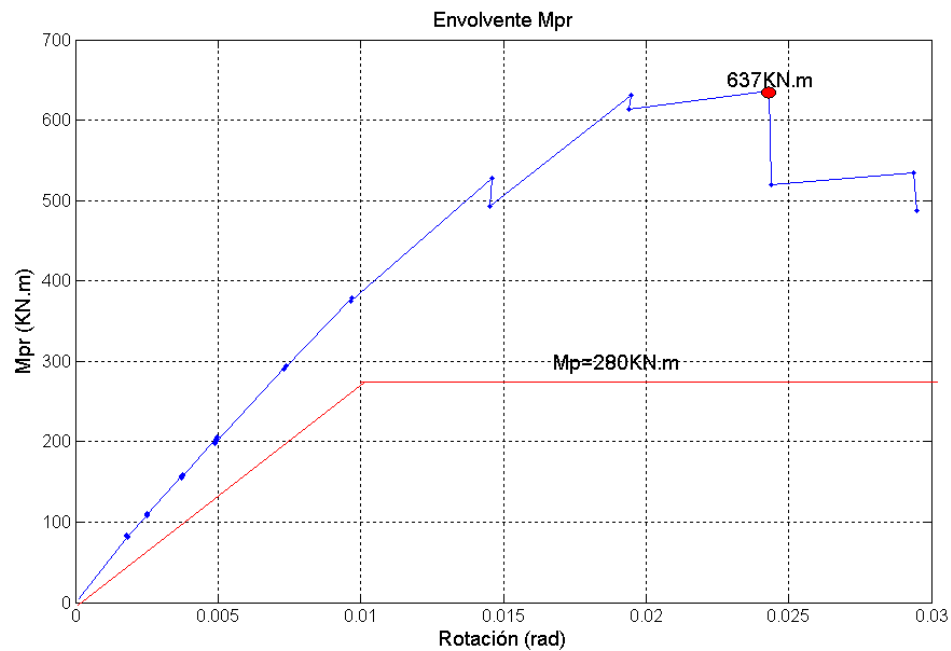


Numéricamente estos límites se pueden evaluar como:

- Límite conexión simple: 0.25 Mp
- Límite conexión  $PR = 2EI/L$  hasta una rotación del 0.01rad

Siendo;

$$\frac{2EI}{L_T} = \frac{2 * 200.000MPa * 5.048 \times 10^8 mm^4}{7210mm} = 280KN.m$$



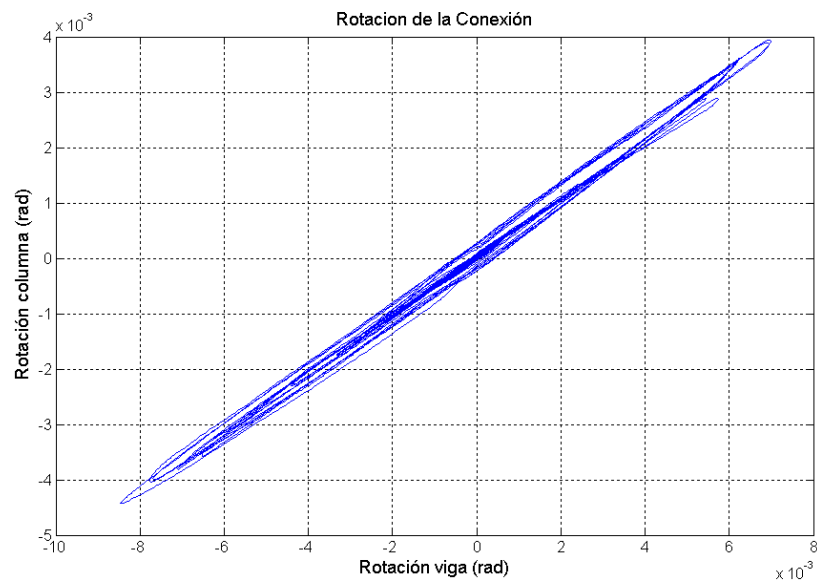
Por lo tanto, la conexión se clasifica como **Totalmente Restringida TR**.

La verificación de la rigidez de la conexión también se puede determinar con la relación entre el giro de la columna y el giro de la viga. De acuerdo con la Figura 38



el giro de la columna se calcula con los desplazamientos L3 y L7 y el giro de la viga con los desplazamientos L2 y L10. La tendencia lineal presentada en la Figura 55 indica que no hubo giro relativo entre columna y viga por consiguiente la conexión se puede considerar **Totalmente Restringida**.

Figura 55. Rigidez de la conexión

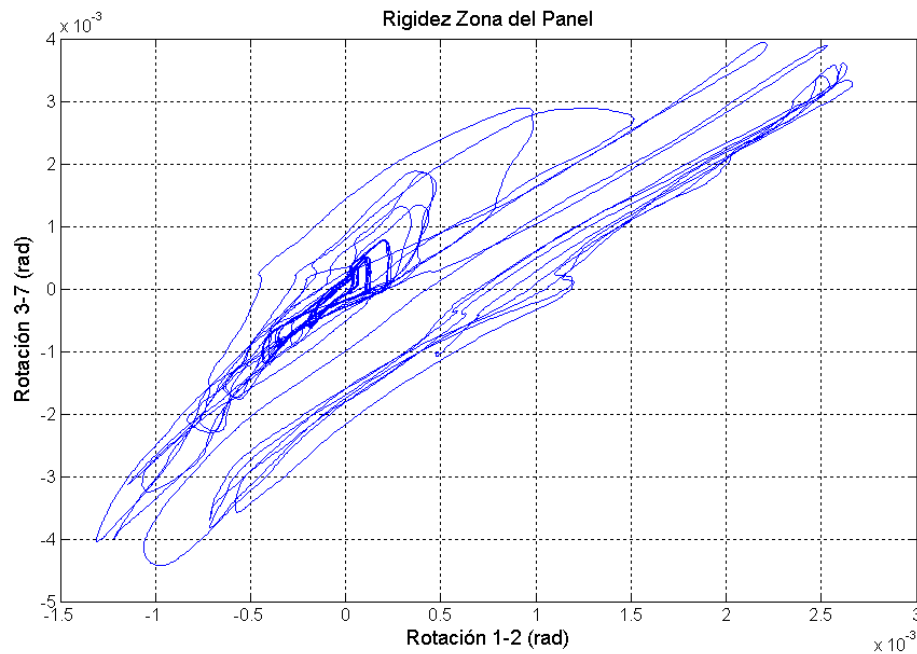


Con el fin de verificar el comportamiento de la zona del panel se grafican los desplazamientos L3 y L7 y el giro de L1 y L2 encontrando un comportamiento lineal índice de cero distorsión. Ver Figura 56.





Figura 56. Rigidez de la zona del panel



### 5.3.3 Clasificación por ductilidad

Según la NSR-10 las conexiones según su ductilidad se clasifican como DES o DMO siempre que tenga la capacidad de soportar un ángulo de deriva de piso mínimo de 0.04 radianes para DES y de 0.02 radianes para DMO. Adicionalmente la resistencia medida a flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos 0.8Mp en cada caso.

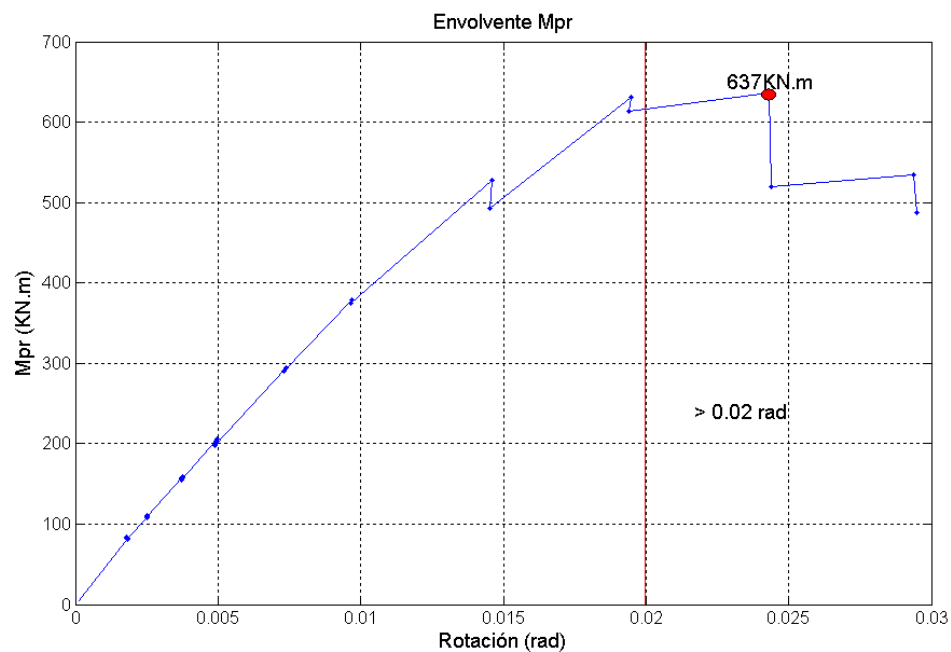
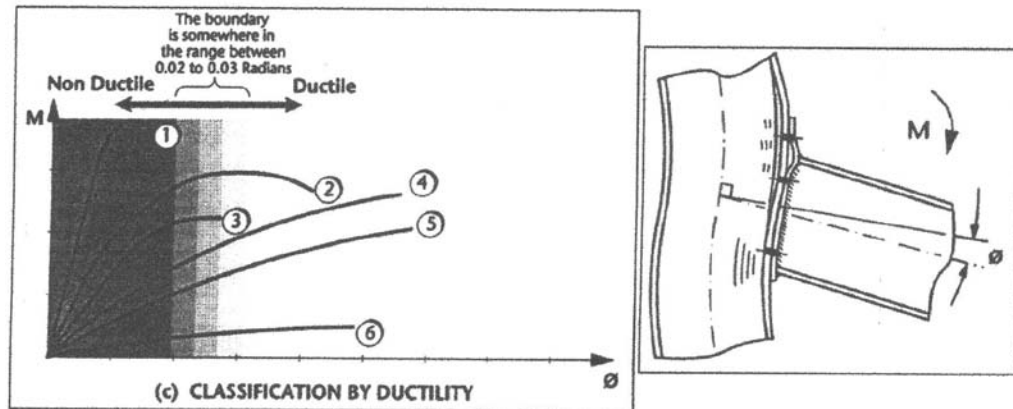
En la Figura 57 se muestra la clasificación de acuerdo con la capacidad de giro, donde los límites están dados así:

- No ductil:  $\phi < 0.02rad.$
- Parcialmente Dúctil:  $0.02rad. < \phi < 0.04rad.$



- Dúctil:  $\phi > 0.04\text{rad}$ .

Figura 57. Clasificación por ductilidad

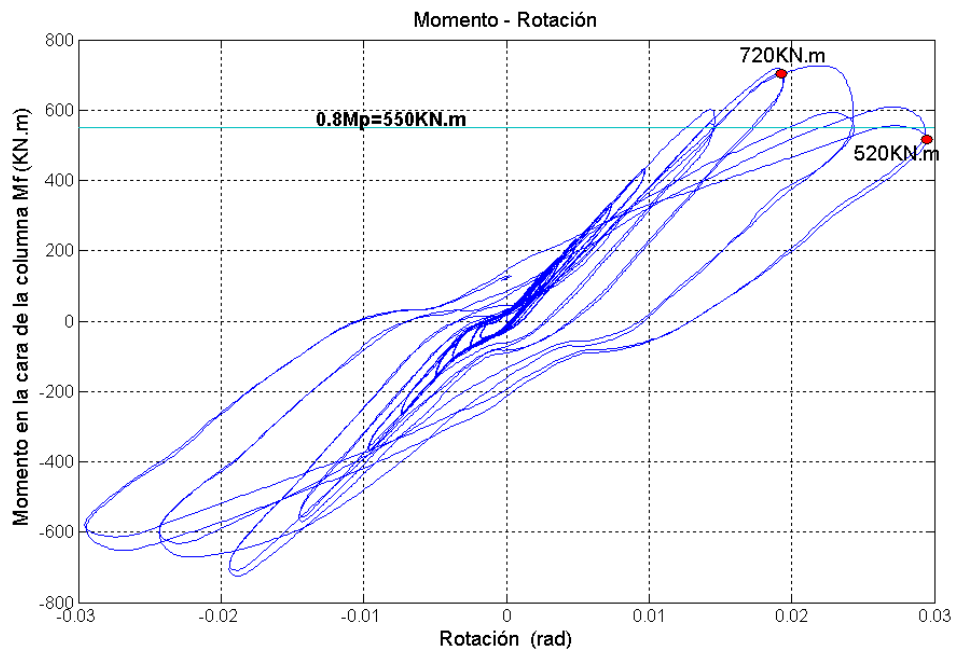


Por lo tanto, la conexión se clasifica como **Parcialmente Dúctil**. Este comportamiento está relacionado con el modo de falla por pandeo ya que la disipación de energía obedece a la desarrollada en el alma entre perforaciones de la viga. No hay incidencia de los patines en esta respuesta.



El diagrama Momento en la cara de la columna obtenido clasifica la conexión como **DMO** ya que a los 0.02radianes el momento en la cara de la columna es superior a  $0.8M_p$ . Donde:

$$0.8M_p = 0.8 * 6.875 \times 10^8 N.mm = 550KN.m$$



### 5.3.4 Pandeo del alma entre perforaciones

El pandeo producido en el alma entre las perforaciones se puede apreciar en las Figura 58 y Figura 59, resaltando el efecto que tuvieron los atiesadores ubicados en las dos primeras perforaciones cercanas a la columna logrando reducir notoriamente el pandeo en esa región. De los resultados obtenidos se puede concluir que la carga de pandeo del alma entre las perforaciones fue:



$$P_{cr} = 195.000N$$

Ya que la carga de pandeo fue inferior a la cortante de plastificación probable  $V_{pr} = 275.289N$  se explica la razón por la que no se alcanzó la plastificación en la zona de las cubreplacas como se asumió en el diseño.

Figura 58. Desplazamiento fuera del plano de alma entre perforaciones

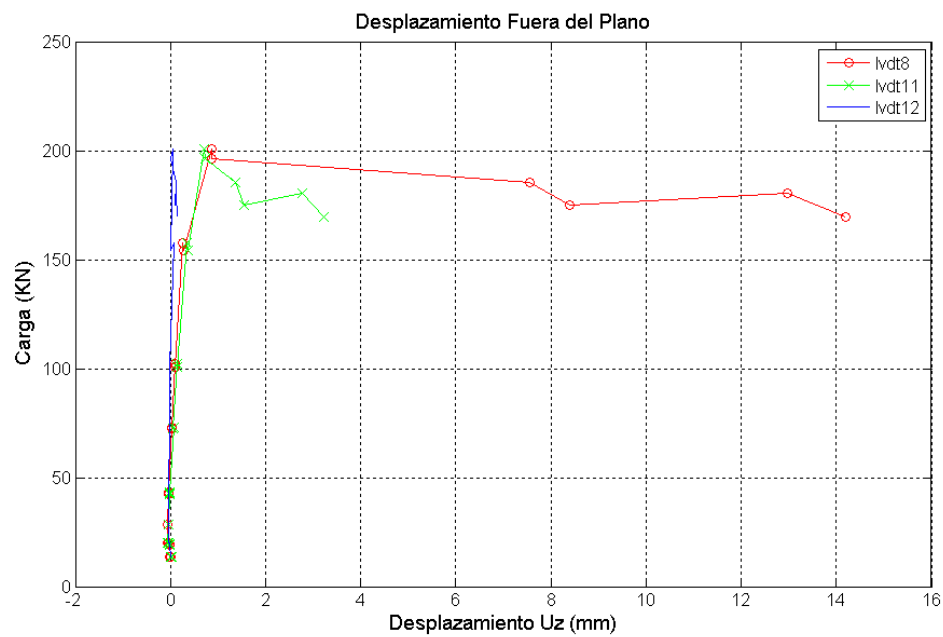
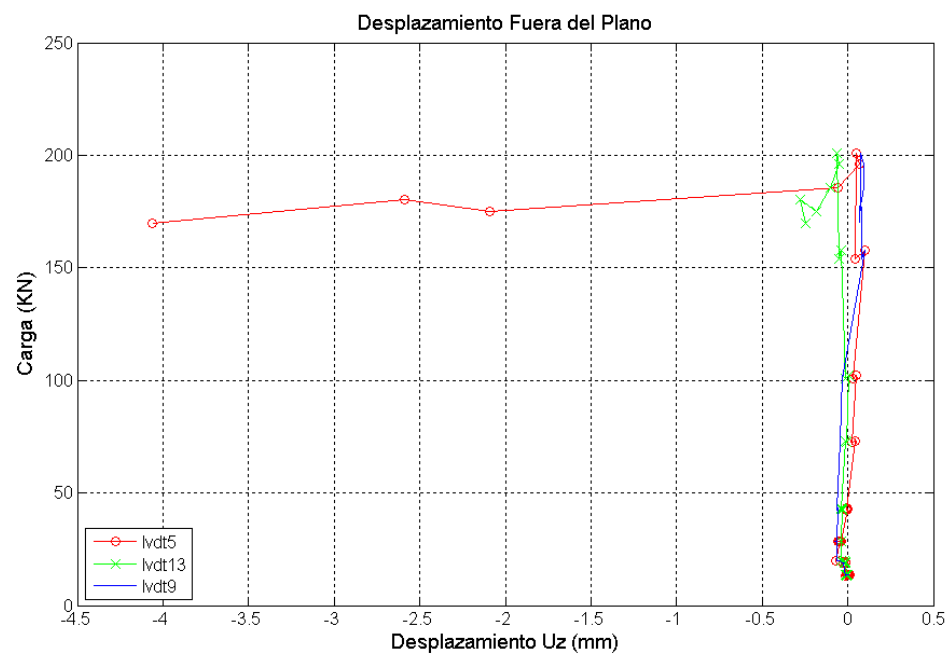




Figura 59.Desplazamiento fuera del plano zona Tee





## **6 CONCLUSIONES**

Este estudio se desarrolló con el objetivo de conocer el comportamiento de una conexión a momento viga-columna empleando una viga celular y se encontró que la conexión puede ser empleada en pórticos resistentes a momento con capacidad moderada de disipación de energía, *PRM-DMO*. Siempre y cuando la viga celular cumpla las relaciones  $S/Do > 1.25$  y  $Hs/Do > 1.5$  y la conexión se diseñe siguiendo los lineamientos de FEMA-355D.

Si se revisa la concentración de población del país se encontrará que los grandes asentamientos como Bogotá, Medellín, Barranquilla y Cartagena están ubicados en zonas de amenaza sísmica intermedia en donde esta conexión es apta.

El pandeo entre perforaciones controla la falla de la viga y por consiguiente la capacidad de disipación de energía de la conexión. Para esta conexión investigada se encontró que la carga crítica de pandeo del alma fue de 199KN. Con un nivel parcial de ductilidad al resistir una rotación de 0.03radianes.

La falla obtenida ratificó la condición de columna fuerte viga débil, lo cual es una gran ventaja de esta conexión, ya que a pesar de tener una viga con alta inercia, las perforaciones se comportan como un fusible protegiendo la conexión. Todos los elementos de la conexión permanecieron en el rango elástico y no hubo distorsión angular entre viga y columna, clasificando la conexión como *Totalmente Restringida*.



El efecto que tuvieron los atiesadores ubicados en las dos primeras perforaciones cercanas a la columna fue positivo ya que protegió la conexión logrando reducir notoriamente el pandeo en esa región.



## **7 RECOMENDACIONES**

- ✓ Continuar con el proceso de calificación de la conexión y medir el efecto de las relaciones  $S/Do$  y  $Hs/Do$  en la capacidad de rotación de la conexión.
- ✓ En la medida que aumenta la altura de la viga disminuye la capacidad de rotación de la conexión (FEMA 355D), por lo tanto se deben evaluar conexiones empleando la configuración propuesta en esta investigación y establecer un límite a la altura de la viga.
- ✓ Investigar el comportamiento de conexiones a momento empleando vigas armadas expandidas dada la facilidad de corte de lámina comparada con el corte de los perfiles de alma llena.





## ***BIBLIOGRAFÍA***

1. *Development of a new composite cellular beam.* **ArcelorMittal.** s.l. : The Singapore Engineer, 2008, Vol. Structural Engineering, págs. 14-16.
2. **Grünbauer BV.** <http://www.grunbauer.nl/eng/ontwikkeling.htm>. [En línea] Grünbauer BV, 2006.
3. **358-05, ANSI/AISC.** *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications.* Chicago, Illinois 60601-1802 : AISC Connection Prequalification Review Panel, 2005.
4. **358-05s1-09, ANSI/AISC.** *Supplement No.1 to ANSI/AISC 358-05 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications.* Chicago, Illinois 60601 : AISC Connection Prequalification Review Panel, 2009.
5. *Failure modes for castellated beams.* **Kerdal, D. y Nethercot, D.A.** Issue 4, 1984, Journal of Constructional Steel Research, Vol. Volume 4, págs. Pag.295-315. ISSN 0143-974X.
6. *Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings.* **Chung, K. F., Liu, T. C. H. y Ko, A. C. H.** Issue 5, CHINA : s.n., 2001, Journal of Constructional Steel Research, Vol. Volume 57, págs. Pag. 467-490.



7. *The moment-gradient factor in lateral-torsional buckling on inelastic castellated beams.* **Mohebkhah, Amin.** Issue 10, Iran : s.n., 2004, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 60, págs. Pag. 1481-1494. 0143-974X.

8. *Bracing requirements for inelastic castellated beams.* **Mohebkhaha, Amin y Showkatib, Hossein.** issue 10, Iran : s.n., 2005, Journal of Constructional Steel Research, Vol. Volume 61, págs. Pag. 1373-1386. ISSN 0143-974X.

9. **Hoffman, R. M., y otros.** *Analysis of Stress Distribution and Failure Behavior of Cellular Beams.* Pittsburgh-USA : s.n., 2006.

10. *Optimum design of steel structures with web openings.* **Lagaros, Nikos D., y otros.** Issue 9, 2008, Engineering Structures, Vol. Volume 30, págs. Pag. 2528-2537. ISSN 0141-0296.

11. *Advanced finite element modelling of perforated composite beams with flexible shear connectors.* **Wang, A.J. y Chung, K.F.** Issue 10, CHINA : s.n., 2008, Engineering Structures, Vol. Volume 30, págs. Pag. 2724-2738. ISSN 0141-0296.

12. *Identification of the buckling capacity of axially loaded cellular columns.* **Sweedan, Amr M.I., El-Sawy, Khaled M. y Martini, Mohamed Ikbale.** Issue 4, 2009, Thin-Walled Structures, Vol. Volume 47, págs. Pag. 442-454. ISSN 0263-8231.

13. *Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers.* **Erdal, Ferhat, Dogan, Erkan y Saka, Mehmet Polat.** Issue 2, Turquía : s.n., 2011, Journal of Constructional Steel Research, Vol. Volume 67, págs. Pag. 237-247. ISSN 0143-974X.



14. *Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams*. **Sweedan, Amr M.I.** Issue 2, Emiratos Arabes Unidos : s.n., 2011, Journal of Constructional Steel Research, Vol. Volume 67, págs. Pag. 151-163. ISSN 0143-974X.

15. **Dinehart, D. W., Coulson, J. y and Fares, S. S.** *Design Guide 2x: Design of Castellated and Cellular Beams*. Chicago, Illinois 60601-1802 : AISC American Institute of Steel Construction, (2012) final review.

16. **FEMA-350D.** *State of the Art Report on Connection Performance*. Washington, United State : Federal Emergency Management Agency, 2000. SAC Joint Venture EMW-95-C-4770.

17. **Aschheim, Mark Amos.** *Moment-resistant structure, sustainer and method of resisting episodic loads* . US PTO 6,012,256 USA, 11 de Enero de 1997.

18. *Seismic Performance of Connections for Cellular Beams in Steel Moment Frames*. **Smoke, R. P., y otros.** [ed.] ASCE. Orlando, USA : 2010 Structures Congress, 2010. págs. 967-978.

19. **AIS, Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica.** *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogota : Comité AIS 100, 2010. págs. F200-F299. Vol. 3. Ley 400 de 1997.

20. **FEMA-350.** *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. USA : Federal Emergency Management Agency, 2000. SAC Joint venture EMW-95-C-4770.



21. **Blodgett, Omer W.** *Design of Welded Estructures*. [ed.] James F. Lincoln Arc Welding Foundation. 8TH Edition. Cleveland, Ohio : s.n., 1966. págs. 4.7-1,4.7-24. Chapter 4.7.
22. *Design of composite and non-composite cellular beams*. . **Ward, J.K.** s.l. : The Steel Construction Institute, 1990. Publication No.100.
23. **ArcelorMittal.** *Sotftware ABC+2.04*. [www.arcelormittal.com/sections] Saint Aubin-France : Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, 2010.
24. **Acero Perdomo, Hernan.** *Precalificacion de una conexion soldada a momento viga-columna para aplicaciones en edificios metalicos*. Cali, Colombia : Tesis, 2005. Universidad del Valle.
25. **Ceron, Cesar.** *Precalificación de una conexión soldada a momento viga-columna con reducción de sección hueso de perro en la viga para edificios metalicos bajo la acción de carga seudo estatica*. Cali, Colombia : Tesis, 2011. Universidad del Valle.
26. **British Standards, BS 5950.** *code of practice for design in simple and continuous construction, hot rolled sections*. London, UK : Structural use of steelworks in building. Part 1., 2000.
27. *Identification of the buckling capacity of axially loaded cellular columns*. **Sweedan, Amr M.I., El-Sawy, Khaled M. y Martini, Mohamed Ikbal.** Issue 4, 2009, Thin-Walled Structures, Vol. Volume 47, págs. Pag. 442-454. ISSN 0263-8231.



## ***ANEXOS***

Anexo A. Metodología de diseño de vigas *Castellated* – ASD.

Anexo B. Memorias de cálculo diseño viga celular

Anexo C. Dossier de Calidad de fabricación

Anexo D. Matriz de datos (archivo bf4)

Anexo E. Planos de diseño y fabricación de la conexión

Anexo F. Video del ensayo experimental